

2011年长江中下游冬春连旱期土壤的湿度变化

王文, 段莹

(南京信息工程大学大气科学学院, 气象灾害省部共建教育部重点实验室, 江苏 南京 210044)

摘要:利用2010年7月至2011年6月南京站逐日平均气压、日平均气温、日最高及最低气温、平均相对湿度、降水量、平均风速、日照时数资料计算了该站综合气象干旱指数,用中国气象局兰州干旱气象研究所及南京信息工程大学干旱监测联合科学试验站2010年10月至2011年6月逐日实时降水量、及10~100 cm土壤含水量资料计算了土壤相对湿润指数,将它们与试验站各土壤层水分含量变化进行对比分析,结果表明:2010/2011年冬春季,南京地区发生了严重的气象干旱,2010年11月5日开始出现轻旱,11月12日达到中旱,28日达重旱,此后维持在中到特旱之间;土壤相对湿度在11月13日达到中旱,在2011年5月2日,气象连续特旱15 d后,土壤达到重旱;气象干旱与农业干旱变化趋势整体上一致,但气象干旱程度更严重,且农业干旱开始和缓解时间比气象上滞后1~3 d,干旱发展滞后5 d以上;气象及表层土壤对降水敏感性较高,而中层土壤干旱过程持续性较好;此外,干旱由表层向深层传递,当气象干旱持续时间达到50~60 d时,土壤由深层向上补充水分。

关键词:长江中下游;冬春连旱;土壤湿度

中图分类号:P468.0⁺23

文献标识码:A

引言

全球有近半数的土地受干旱灾害威胁,干旱灾害每年给世界造成严重的经济损失。就我国而言,平均2~3 a就发生1次严重干旱灾害^[1],干旱引发的灾害是我国从古到今必须面对的最严重的自然灾害之一^[2]。

土壤水分含量与植物的生长息息相关,是农业生产的必要条件,因而农业干旱程度可由土壤干旱的程度来体现。土壤干旱胁迫使植物的长势、生理机制、激素水平等都会发生一系列变化,土壤水分亏缺能明显抑制作物根系和地上部生长,显著降低作物的生物量、产量和收获指数^[3]。全世界每年由于水分亏缺导致的减产超过其他因素造成的减产的总和^[4]。

影响土壤水分含量的因子很多,包括土地利用(植被)、气象(降雨)、地形、土壤、人为活动等^[5]。近年来,随着全球气候变暖,由气象干旱导致的土壤干旱已成为制约植物生长的主要气象灾害^[6]。当降水持续偏少发生干旱时,供水水源匮乏,影响土壤

的水分含量。秦鸿儒等人^[7]的调查研究表明,连续的干旱会使得土壤水分极低,严重危害植物生长、造成作物减产,影响居民生活及社会经济发展。

长江中下游地区人口密集,是我国经济发达地区,也是我国重要的粮、棉、油生产基地。杨绚^[8]等将我国划分为11个气候区域,其中江淮及长江中下游地区的降水(干旱)异常是我国第一显著异常区。因此,研究这一地区旱涝情况对我国的防汛抗旱具有重要意义。我国学者对长江中下游地区的旱涝分布特征有大量的研究^[9-12],研究多集中于夏季,且分析多着重于涝灾及灾害的预测上。由于全球变暖的影响,我国南方的旱情也出现了增加的趋势,长江中下游地区冬夏季干旱程度在增大^[13],因此,研究南方干旱情况也是很有必要的。另一方面,学者们的研究多集中于探索旱涝灾害的分布特征、变化趋势以及预测等方面,而对气象干旱和农业干旱间的关系及相互作用研究很少。

2011年冬春季节,长江中下游地区降水持续偏少,加上气温显著偏高,发生近60 a来最严重的冬春气象干旱^[14]。此次气象干旱持续时间长,干旱导

收稿日期:2012-04-10;改回日期:2012-05-17

基金项目:公益性行业(气象)科研专项项目(GYHY201006023)及江苏高校优势学科建设工程资助项目共同资助。

作者简介:王文,男,甘肃会宁人,副教授,主要从事中尺度动力学和气候诊断方面的研究. E-mail:wwllw003@126.com

致江河、湖泊水位异常偏低,水体面积减少明显,引起农业干旱,使得农业生产受到影响,影响了我国经济社会的发展。本文利用南京多年逐日降水资料,及南京信息工程大学干旱监测联合科学试验站的实时观测资料,分析南京2011年冬春干旱情况,及各层土壤水分含量在连续干旱情况下的变化,以了解干旱事件对土壤水分动态变化及其空间分布的影响,加深对气象干旱与农业干旱的关系及其相互作用的认识,对农业干旱监测及预测的研究具有重要意义。

1 资料与方法

1.1 资料

所用资料为中国气象局兰州干旱气象研究所及南京信息工程大学干旱监测联合科学试验站2010年10月至2011年6月每日实时观测资料^[15],其中包括实时降水、10 cm、20 cm、30 cm、40 cm、50 cm、60 cm、80 cm及100 cm土壤水分含量;2010年7月至2011年6月南京站逐日日平均气压、日平均气温、日最高及最低气温、日平均相对湿度、降水量、平均风速、日照时数资料。

1.2 旱涝指标

利用气象干旱综合指数(CI)来描述南京地区气象旱涝情况,用土壤相对湿度干旱指标来表示农业干旱情况。

1.2.1 气象干旱综合指数(CI)

气象干旱综合指数(简称CI)是张强等人^[16-17]发展的一个以标准化降水指数(SPI)、相对湿润指数(MI)为基础建立的一种干旱综合指数,CI指数既反映了短时间尺度(月)和长时间尺度(季)的降水量气候异常情况,又反映了短时间尺度(影响农作物生长)的水分亏欠情况。该指标适用于实时气象干旱监测和历史气象干旱的评估。其计算公式为:

$$CI = aZ_{30} + bZ_{90} + cMI_{30}$$

式中, Z_{30} 、 Z_{90} 分别为近30 d和近90 d标准化降水指数SPI值, MI_{30} 为近30 d相对湿润度指数, a 、 b 取0.4, c 取0.8。其中标准化降水指数SPI、相对湿润度指数MI的计算方法依照文献^[16],相对湿润度指数中的潜在蒸散量采用FAO推荐的彭曼—蒙泰斯(Penman - Monteith)蒸散公式^[18]计算。

1.2.2 气象干旱过程的确定

当CI指数连续10 d为轻旱以上等级时,确定发生一次干旱过程。干旱过程起始时间为第1次CI指数达轻旱以上等级的日期。在干旱发生期内,当CI连续10 d为无旱等级时干旱解除,干旱过程结束,结束日期为最后1次CI指数达无旱等级的日期。干旱过程开始到结束期间的时间为干旱持续时间。干旱过程内各日的CI指数为轻旱以上的干旱等级之和,表示干旱过程的强度,其值越小干旱过程越强^[16]。

1.2.3 土壤相对湿度干旱指标(R)

本文为研究气象干旱与农业干旱间的关系,用土壤相对湿度干旱指数^[16,19]来描述土壤的干旱程度,该指数是反映土壤含水量的指标之一,适合于某时刻土壤水分盈亏监测,其计算公式为:

$$R = \frac{w}{f_c} \times 100\%$$

式中, R 表示土壤相对湿度(%); w 土壤重量含水率(%); f_c 土壤田间持水量(%),由于其干旱标准适用于旱地农作物^[16],因而在运用中对其等级划分进行了适当调整。

2 基于CI指数的旱涝情况分析

图1为南信大干旱监测联合科学试验基地2010年10月至2011年6月初基于CI指数计算得到的旱涝等级。图中实线为CI旱涝等级,0, -1, -2, -3, -4分别代表正常、轻旱、中旱、重旱以及特旱。

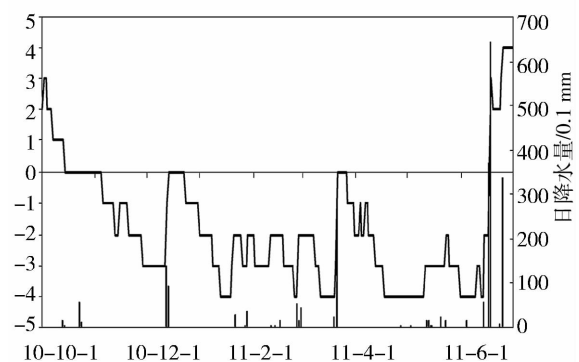


图1 2010年10月至2011年6月CI指数旱涝等级及日降水量(单位:0.1 mm)
(实线为CI旱涝等级,柱状线为降水量)

Fig.1 The meteorological drought composite index (CI) and daily precipitation (Unit: 0.1 mm) from Oct. 2010 to June 2011 (the solid line shows drought index, the histogram shows precipitation)

从 CI 指数旱涝等级来看,2010年10月上半月为涝,之后维持在正常情况。11月初开始出现干旱,干旱逐渐加重,11月底12月初时达到重旱,一直持续至12月中旬,之后的降水使得其回到正常水平。正常情况维持近10 d后,12月下旬再次开始干旱,其后降水较多年同期水平持续偏少,使得干旱情况严重,一直持续至2011年3月19日发生的降水过程。此次降水过程使得干旱恢复至正常状态,但仅维持了6 d后,再次开始干旱。干旱持续至6月中旬,此后降水量的陡然增加使得干旱得以解除并迅速转涝。根据对干旱过程的确定方法,2010年10月至2011年6月发生了2次干旱过程,分别为:2010年11月5日至12月22日,持续时间为48 d;2010年12月23日至2011年6月26日,持续186 d。2次干旱过程期间连续发生,干旱延续时间长,干旱程度强。由综合气象干旱指数分析可见,南京地区从2010年12月至次年的春夏季,表现为持续的干旱,干旱情况非常严重。

从实际情况上看,长江中下游地区从2010年10月至2011年5月,与历史同期相比降水持续偏少,旱情严重。同时,6月中旬降水量陡然增大,长江中下游许多地区发生了旱涝急转现象。从 CI 指数表现的旱涝情况来看,从2010年11月至2011年6月初干旱严重,而6月中旬后迅速转涝。由图1所示, CI 指数干旱发生发展过程缓慢,这与干旱灾害缓慢的致灾过程、旱灾的成灾原因^[20-22]及其持续时间长,后延影响大的特点^[23]是一致的。同时,2011年1~3月,在降水量很小的情况下 CI 指数波动明显,说明其对降水有很好的灵敏性。可见,该指数基本上能够表现出此次的冬春连旱事件。

由上述分析可知综合气象干旱指标(CI)能够表现出南京地区干旱情况,而 CI 干湿指标与土壤水分含量的关系及其是否能较好的表现农业干旱,这将在下面进行对比分析。此外,鉴于各种干湿指标各有优缺点,几种常用的干湿指标哪种更适合表述南京地区的干湿情况,这将在日后进行研究。本文暂以 CI 指数表示气象旱涝情况。

3 各层土壤水分含量变化分析

由上一节的分析可知,2010年10月至2011年5月,南京地区出现了持续性的干旱。在此条件下,分析该地该时段的各层土壤水分含量变化情况,有助于了解土壤水分垂直结构及不同深度土壤水分含

量变化特征。同时,根据10~100 cm土壤对降水的不同反应,将土壤进行分层,便于分析研究各层土壤对气象干旱的响应。本文将发生有效降水(即单日降水量 >10 mm或连续2 d降水量 >15 mm)至下次有效降水之前的时期定为一个时段(或一次过程),将2010年10月至2011年6月分为多次过程进行叙述。

图2为2010年10月至2011年6月10 cm土壤水分含量及日降水量情况。根据图2中的日降水量情况,将2010年10月至2011年夏初分为6个时段(过程),分别为2010年10月1日至2010年12月11日、2010年12月12日至2011年3月中旬、2011年3月19日至5月9日、2011年5月10日至5月21日、2011年5月22日至6月中旬、以及2011年6月17日至6月底。

图中折线表示该层土壤含水量(%),柱状实线表示每日降水量(0.1 mm),黑色箭头所指处为在没有降水发生情况下,水分含量却有较明显增加,考虑是否为深层土壤向表层输送的水分(图3-图7的说明与此相同)。

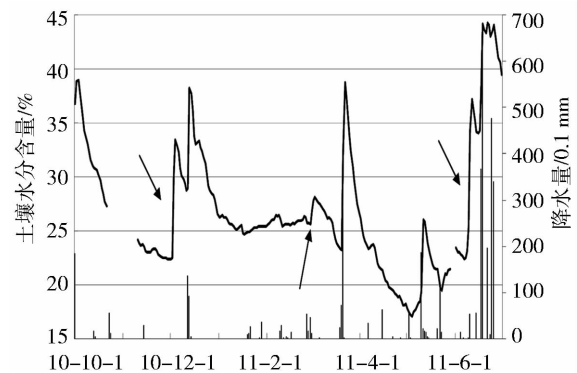


图2 10 cm 土壤水分含量及降水量
(折线为水分含量,柱状线为降水量)

Fig. 2 The 10 cm soil water content and daily precipitation (the solid line for water content, the histogram for precipitation)

对图2进行分析可见,第一个时段,即从2010年10月至12月初降水非常少,10 cm土壤水分含量持续降低约17%。12月2~4日,水分含量显著增长,增长速率快,2 d增长了约11%水分含量,但其间没有降水。12月12~14日发生有效降水,土壤水分在1~2 d内升至最高后迅速下降,到2011年1月中旬降至25%左右,之后维持在25%左右一直到3月中旬。在此期间最大日降水量只有5.3

mm, 累计降水量不到 30 mm, 降水持续偏少。此时段内对应的干旱等级维持在中旱。2月28日至3月3日, 水分含量在几乎没有降水的情况下有一次较小幅度升高。2011年3月19~21日有一次降水过程, 即第3次过程开始, 土壤水分含量在22日升至约40%, 之后迅速下降, 下降速率及下降程度远大于前2个时段内水分的下降, 15 d内水分含量降至降水发生前的水平。5月4日降至该时段内水分含量最低处, 只有约17%。对应的气象干旱达到重旱。5月10日及5月22日各发生一次有效降水过程, 水分含量有所升高, 气象干旱也有所缓解, 在中一轻旱等级。但由于降水量不大加之前期干旱严重, 5月22日的有效降水导致土壤水分的升高趋势非常小。5月24日至第6次过程发生前几乎没有降水, 但该层土壤含水量却有明显的增加, 期间气象干旱等级维持在中旱。6月中旬开始降水量增大, 土壤水分含量上升到较高水平。此外, 由上述分析可见, 2011年10月至2011年6月期间, 有3次在没有效降水情况下, 该层土壤水分有较明显的增加, 判断水分是否由深层传输至表层还需对其下各层进行分析。

图3为20 cm土壤水分含量变化。同10 cm处土壤相似, 由于2010年10~12月初, 即第一次过程降水很少, 20 cm土壤水分含量也表现为持续下降, 之后维持在30%左右。与其上10 cm处相同, 12月2~4日, 在没有降水发生的情况下, 该层土壤水分含量有较显著增长。12月中旬进入第2个时段, 有效降水使土壤水分含量在1~3 d内有所升高, 之后持续下降, 此后降水很少, 土壤水分含量维持在30%左右。与其上层对应, 2月20~25日水分有小

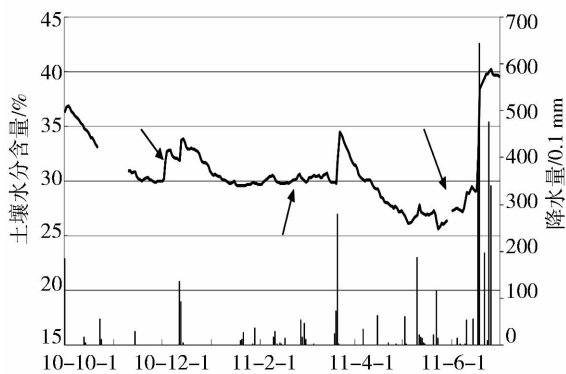


图3 20 cm土壤水分含量及降水量

Fig. 3 The 20 cm soil water content and daily precipitation

幅增长, 上升时间早于10 cm土壤。此后直至2011年3月下旬才有一次有效的降水过程, 土壤水分含量增加至约35%, 之后迅速下降, 同上层相似, 在15 d左右降至降水前的土壤水分含量水平, 下降程度比前2次过程大。第4及第5次有效降水对该层水分含量影响很小, 水分含量在5月中下旬降至最低点约25%。5月底至6月上旬几乎没有降水, 但20 cm土壤含水量的变化与10 cm处相似, 含量有所增, 增长时间在5月24日至第6次过程开始前。至第6个时段开始, 降水量陡然增大, 土壤水分含量迅速升至40%左右。

图4表示了30 cm土壤水分含量。与10 cm及20 cm相比, 30 cm土壤水分含量变化比较平缓。在有降水, 但降水不充足的条件下, 对其水分含量的补充效果并不太大, 20 mm以下的降水对其水分含量的补充作用几乎没有, 而约30 mm日降水量也仅使得其土壤水分含量升高不到2%。从2010年10月至2011年6月初, 30 cm土壤水分总体表现为下降趋势。其中第一时段内, 水分含量持续下降幅度相对较大; 12月初有微量增长, 与上2层相对应。2011年1月至3月中旬, 水分含量基本维持在33%; 期间2月19~25日水分有小幅增长, 比20 cm土壤稍早; 第3, 4个时段间, 水分含量表现为持续下降趋势, 下降至29%。之后与上2层相对应, 5月底至6月初, 在几乎没有发生降水的情况下, 土壤水分含量有所增加(转折点在5月23日)。进入6月中旬即第6次过程后, 降水量陡然增大, 相应的土壤水分含量也迅速升高至40%左右。由上述分析可见, 虽能看出与前2层相应的几次过程, 但表现已经很不明显, 因而将10~30 cm分为第一层, 表示土壤表层。

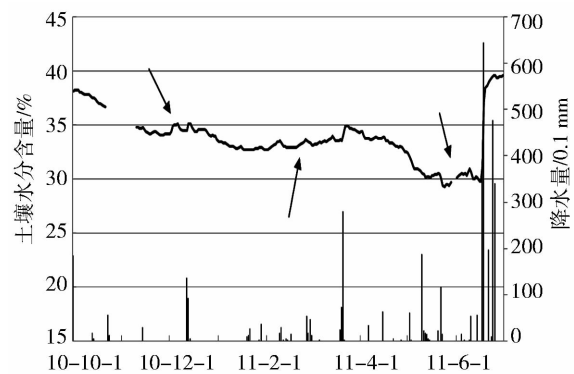


图4 30 cm土壤水分含量及降水量

Fig. 4 The 30 cm soil water content and daily precipitation

图5表示40 cm、50 cm及60 cm土壤水分含量及降水量。由图可见,40~60 cm土壤的水分含量变化较一致,其变化趋势与30 cm相似,但变化更加平缓。这3层土壤水分含量在前5个时段中均没有陡然升高或降低的情况,其水分的升高与降低为缓慢的变化过程,近30 mm日降水量使得水分上涨幅度很小且变化缓慢。由此可见,30 mm以下的日降水量并不能直接影响40 cm及其以下层次,而是需要通过表层土壤向下渗透对其进行补充。因此将40~60 cm定为第二层,表示土壤中层情况。从整体趋势上看,前4个时段,即2010年10月至2011年5月下旬,水分含量总体上表现为持续的下降。与表层土壤不同的是,12月初表层水分含量均有不同程度的上升,而中层水分含量为持续且缓慢的下降趋势,或维持在35%左右。可见,此次表层土壤水分的陡然增长并不能判断为下层向上输送水分,有可能是数据问题。而与上面各层对应,2月底的水分上升幅度虽然很小但依然存在。

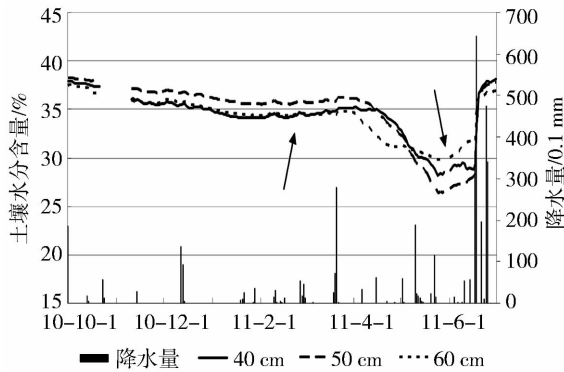


图5 40、50、60 cm 土壤水分含量及降水量

Fig. 5 The 40、50、60 cm soil water content and daily precipitation

2011年4~5月底,即第3、4时段期间,中层土壤水分下降幅度大且下降速率快,降低约7%,但其水分下降比表层土壤水分下降晚,表层下降开始时间为3月下旬。与表层相似,5月底至6月初时,在几乎没有发生降水的情况下,土壤水分含量有所增加,增长开始时间均在5月23日左右。进入6月中旬后,降水量陡然增大,相应的土壤水分含量也迅速升高,但均未达到40%。

图6为80 cm土壤水分含量及降水图,与其他各深度土壤相比,该层土壤水分含量明显较低,前5次过程水分基本维持在30%以下。第一时段内略微表现为下降趋势,之后至2月中旬基本维持在

28%左右。2月15~22日期间水分含量有相对明显的下降,对应2月下旬至3月初其上各层水分含量逐层的升高,可见此次水分含量的下降有可能是向其上土壤传输水分。在第3、4时段中,4~5月水分下降趋势明显,下降至25%左右,降水对其水分含量的影响很小,而长时间的气象干旱及上层土壤的缺水对其影响明显。从5月下旬至6月,与上面各层对应,在降水量很小的情况下,该层水分含量迅速增加,达到35%以上,且增长趋势大于除10 cm层的其上各层,增长转折时间在5月17日。其转折时间比上面各层水分升高的时间都早,且从各层水分增长开始的时间上看也有先下后上的增长趋势。水分有由下而上增长的趋势,加之此前降水很少气象干旱较重,导致包括80 cm层在内的各层土壤干旱,推测是更深层土壤向其上各层土壤补充水分。由于80 cm层土壤水分含量及其动态变化与其上面各层及其下层土壤都有一定的区别,因此将80 cm层定为一过渡层,用以分隔中上层土壤及深层土壤。

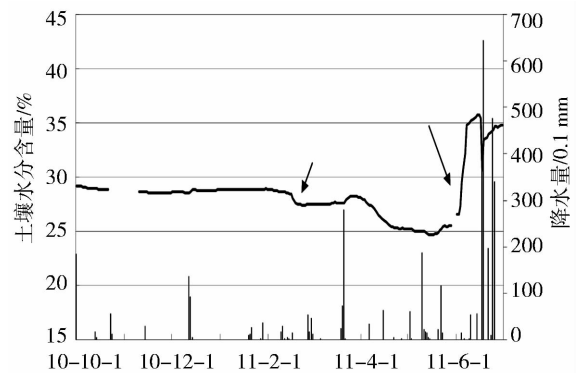


图6 80 cm 土壤水分含量及降水量

Fig. 6 The 80 cm soil water content and daily precipitation

图7为100 cm土壤水分含量。6个时间段中,降水入渗补充对该深度土壤基本没有作用,持续的干旱和其上土壤的缺水对该处土壤水分有一定影响但影响不大,水分含量维持在35%左右。在5月上中旬出现一次相对较大的波动,水分含量在5月3~12日出现较明显的降低,后回升并维持在37%左右。与其上各层对比,该处土壤水分含量在上层水分含量降至较低水平时出现了较明显下降,而降低后很快又恢复到一定水平。一方面可见100 cm土壤的水分含量受降水和蒸发等地面各因素的影响较小,可能取决于地下水系;另一方面,该时间段雨量很小,其上的各层土壤水分均表现为持续的降低,该层土壤水分明显下降并恢复后,其上各层水分含量

开始升高,综合此前的分析可见各层土壤水分含量增长在时间上表现出明显的先下后上,因而考虑中上层水分的增加可能是由下层补充的,但其具体过程还需进一步深入研究。

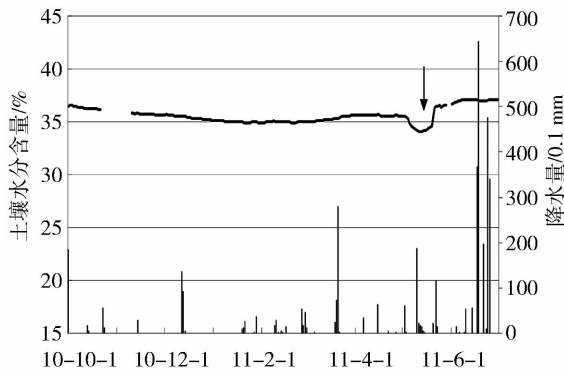


图7 100 cm 土壤水分含量及降水量

Fig. 7 The 100 cm soil water content and daily precipitation

整体上看,除深层土壤外,其它各层的水分含量在2010年秋季均表现为下降趋势;从2010年12月至2011年3月中下旬,虽然降水也很少,但各层水分含量基本维持在一定水平;2011年3月底4月初开始,表层、中层及过渡层土壤水分含量降低速率快,且下降幅度明显增大,直到6月才转为上升趋势,而深层土壤水分在5月初才出现较明显下降,5月中旬即恢复至一定水平。3月底开始的水分含量下降速率快,且幅度大于冬季的水分下降幅度,其可能原因:一是进入春季后,气温开始升高,使得蒸发量加大,在水分补充很少的情况下,土壤水分迅速减少;二是前期持续的干旱,少量的降水不足以缓解各层土壤的干旱,因而水分含量下降速率快。

综合前面分析可见,不同土壤层对降水的响应时间及受影响程度均存在差异:表层土壤受降水影响程度最大且响应时间最短,在降水当日至其后1~2 d内水分升至最高,之后迅速下降;中层土壤对降水的响应时间及受影响程度由降水量的大小决定:降水量大小与响应时间呈反比,与影响程度呈正比,即降水量较小,中层土壤的水分主要靠表层土壤水分下渗缓慢补充,增长程度小,而降水量大时与之相反,水分含量升高程度大且迅速;过渡层土壤水分对降水的响应与中层相似,但降水对其影响小;而对深层土壤而言,降水对其影响甚小。从各层水分开始下降的时间来看,不同的土壤层对于干旱的响应也存在区别,干旱是由表层向下层传递的,这将在下节进行分析。

4 各层土壤水分含量与旱涝情况的对比

图8为2010年10月至2011年6月各层土壤水分含量及气象旱涝等级,其中表层水分含量为10 cm、20 cm和30 cm土壤水分含量平均值;中层为40 cm、50 cm及60 cm平均值;过渡层为80 cm水分含量;深层以100 cm土壤水分含量作为代表;黑色椭圆区域为上节分析中,在没有降水的条件下土壤水分含量升高的区域。

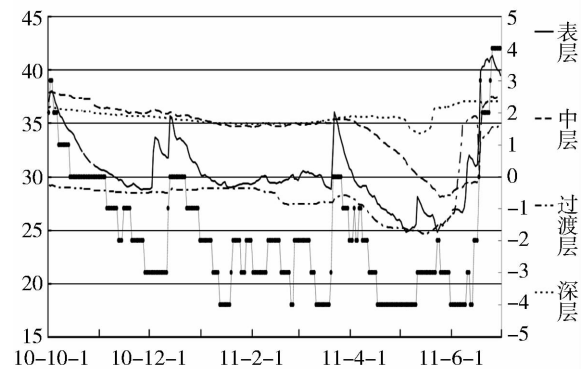


图8 2010年10月至2011年6月各层土壤水分含量及气象旱涝等级
(次坐标为旱涝等级)

Fig. 8 The meteorological drought composite index (CI) and soil water content of each layer from Oct. 2010 to June 2011 (The secondary coordinates stand for drought grades)

从旱涝情况上看,从2010年11月起,气象上基本处于干旱状态,CI指数在2011年冬春季甚至夏初表现出连续的干旱,严重的干旱使得土壤水分含量减少。而从各土壤层水分含量的变化上看,不同土壤层对气象干旱的响应时间及受影响程度均存在差异。

由图可见,各土壤层水分下降趋势与气象干旱程度表现出较好的正相关关系。第一时段内(第4节中根据有效降水划分为6个时段),CI指标从重涝逐渐发展为重旱,相对应的此时段的各层土壤水分均表现出下降的趋势,且中上层土壤水分下降趋势明显。第二次过程中CI指数前期表现为明显的下降趋势,之后在中一重旱等级间波动,相应的各层土壤水分含量来看,表层土壤水分前期下降较大,之后各层水分含量均维持在较低水平。进入第3个时段,干旱等级很快降低并维持在特旱,相应的各土壤层水分含量都迅速的降低。第4个时段干旱有所

减轻,各层水分下降趋势也相应减缓。然而第5个时段中,干旱达到特旱等级,然而除深层土壤外,各土壤层水分含量均有明显升高,由上节的分析考虑上层水分的增加可能是由下层补充的,其具体过程还待进一步的研究。第6个时段开始后降水量陡然增大,气象干旱得到解除并迅速转涝,各层水分含量也相应升高。

从各土壤层水分下降的时间上看,干旱现象表现出明显的由上向下传递的趋势,越深层的土壤对干旱的反应越慢,此在第3次过程中表现最为明显:表层土壤水分从3月下旬开始持续下降,中层及过渡层水分下降开始于4月初,与表层相比延迟了5~8 d,而深层土壤在5月初才出现水分才有较明显下降,比中层土壤滞后近30 d。

此外,由上节的分析可见,当干旱到一定程度时,深层土壤可能会向上层土壤补充水分。2010年10月至2011年6月期间,考虑可能为深层土壤向上补充水分的情况有2次,一次在2月底,另一次为5月中下旬。第一次补水时,表层及中层土壤的水分有所上升,水分上升前过渡层水分有明显的下降,而深层土壤水分基本不变,水分由过渡层向上传输。5月中下旬时,各层水分含量均有升高且升高程度大。从各层升高时间上看,有较明显先下后上的上升趋势,水分由深层向表层传输。可见,5月中下旬的水分补充相较于第一次来说补水层次更深。

从补水前连续干旱时间来看,前一次补水前CI连续干旱日数为59 d,后一次连续干旱时间为50 d,2次补水的前期CI指数连续干旱日数在50~60 d左右。从前期干旱程度来看,第一次补水之前气象干旱基本维持在中旱等级;而第二次深层向上补水发生前持续少雨,气象干旱达到特旱,虽然CI连续干旱日数没有第一次时间长,但由CI指数干旱过程的确定标准上可知,指数虽恢复至正常等级,但干旱过程并未解除,干旱从2010年12月一直持续至此,干旱程度非常严重。可见,5月中下旬出现深层土壤向浅层补充水分前的干旱程度大于第一次,这可能是第二次比第一次补水层次更深的原因。

5 农业干旱与气象干旱的对比

由上述分析可见,各土壤层水分与气象干旱有较好关系,但单由土壤水分无法定量的表现出土壤的干旱程度,不能很好的对比气象干旱与农业干旱之间的关系。因此,引入土壤相对湿度指标来描述

土壤干旱程度,以土壤干旱程度来反应农业干旱的程度,与气象干旱进行对比分析。其中,计算土壤相对湿度指标需要用到的土壤田间持水量($f_c, \%$)根据文献[24]估算而得。该指标采用10~20 cm土壤湿度作为标准。农作物耕作层一般厚15~20 cm,作物根系最为密集,与农作物的生长的关系也最为密切,因此本文着重分析10~20 cm的农业干旱情况,而10~50 cm土壤湿度仅作为参考,用以对比中层与表层的联系与差别。

从逐日CI、10~20 cm及10~50 cm土壤相对湿度指标的变化可以看出干旱发生、发展和结束过程中的变化细节(图9)。整体变化趋势上看,气象干旱与土壤干旱变化趋势基本一致:第一个时段2010年10~12月表现为持续的下降,第二个时段干旱维持在一定水平,第三个时段开始,干旱严重,直到6月中下旬干旱解除。

在第一时段内,表层土壤在10月下旬至11月上旬期间为轻旱,11月13日达到中旱,气象干旱在其前一天达到中旱。此后气象干旱在该月底增强至重旱,表层土壤反而回升至正常状态,由第4节分析可知此处土壤水分的升高原因不明,有可能为数据偏差。该时段内中层土壤一直维持在轻旱。第二个时段开始,CI指数及土壤湿度均升至正常水平,之后CI指数及表层土壤维持10 d左右再次开始干旱,10~50 cm土壤仅在有效降水期间恢复至正常,降水结束后立即降至轻旱,可见此次降水仅解除了气象及表层土壤干旱,中层土壤干旱并没有得到解除。气象干旱逐渐发展为特旱,此后在中到重旱间波动,3月中旬再次达到特旱。相对应的,表层土壤基本持续在轻旱,其间出现2次重旱。中层土壤一直维持在轻旱。第3个时段开始,干旱持续加重,CI指数达到特旱,表层土壤达到重旱,中层土壤也达到中旱等级。持续至6月下旬,气象及各层土壤干旱才得以解除。

下面从干旱开始时间、干旱程度、发展渐进性、降水敏感性及干旱的持续性几个方面分别对土壤相对湿度干旱指标与气象干旱指标进行对比:

(1)从干旱开始时间上看:CI指数干旱开始时间与土壤干旱存在一定的时间差。在第一时段期间,CI干旱起始时间比土壤干旱滞后近20 d,而第二及第三时段由正常转为干旱开始时间两者相差不大,CI指数甚至还要早2~3 d。CI第一次干旱开始时间相差如此大的原因,可能是由于CI指数既受到

前期月尺度降水和蒸发影响,又受其前期季尺度降水影响。对比 M_{30} 、 SPI_{30} 及 SPI_{90} 指数旱涝等级(图略)可见, M_{30} 指数第一时段内干旱开始时间与土壤干旱开始时间基本一致,而 SPI_{30} 及 SPI_{90} 干旱都有明显的滞后,特别是 SPI_{90} 。由此推测,可能由于前期降水较多致使气象达到重涝,且季尺度降水量影响较大,使得 CI 指标由涝转旱的时间较长;

(2)从干旱程度上看:表层土壤前2个时段基本维持在轻一中旱,第三个时段开始维持在中旱,期间最早时降至重旱,直至6月中旬干旱才得以缓解;中层土壤前2个时段一直保持在轻旱,第三个时段后降至中旱并维持至6月中旬; CI 指数从重涝到特旱,波动范围较大,整个过程基本维持在中一重旱。由此可见,气象干旱与土壤干旱相比整体偏旱且干旱严重,即气象上比农业上更容易干旱;

(3)从干旱发展渐进性上看:土壤干旱比气象干旱的发展慢,而中层土壤又比表层土壤干旱发展慢。第一个时段内,气象干旱指数在干旱开始24 d后降至重旱等级,而表层土壤湿度干旱开始27 d才降至中旱。第二个时段中, CI 指数在20 d达到特旱,之后再维持在中一重旱间,3月下旬再次达到特旱。相应的,表层土壤基本持续在轻旱但其间出现2次重旱,2次都是在气象达到中旱后20 d,重旱后10 d,特旱后7 d才达到重旱,且2次特旱得到缓解后的2 d,土壤干旱才得以缓解。第三个时段开始后,气象上比表层土壤提前2 d降至轻旱, CI 达到中旱之后的6 d表层土壤也达到中旱等级,干旱程度继续加强, CI 降至特旱,同时中层土壤也降至中旱。特旱持续15 d后,表层土壤出现重旱。气象干旱指数在4月30日降至最低,表层土壤5 d后降至最低,而10~50 cm土壤在5月底才降至最低,滞后约20 d;

(4)从对降水的敏感性上看:气象干旱及土壤干旱对降水都较为敏感,但是响应时间上土壤比气象稍慢。当有降水发生时,气象及土壤干旱强度均随降水量有相应的缓解,特别是 CI 指数及表层土壤,有效降水发生后干旱等级迅速上升且升高幅度大。从上升时间上可见,土壤干旱等级在气象干旱开始缓解后1~3 d后才开始缓解;

(5)从干旱过程的持续性上看,气象及表层土壤干旱受降水影响明显,其过程持续性相对10~50 cm土壤较差,表明气象及表层土壤干旱情况相对容易得到缓解,而中层土壤干旱持续性较好。

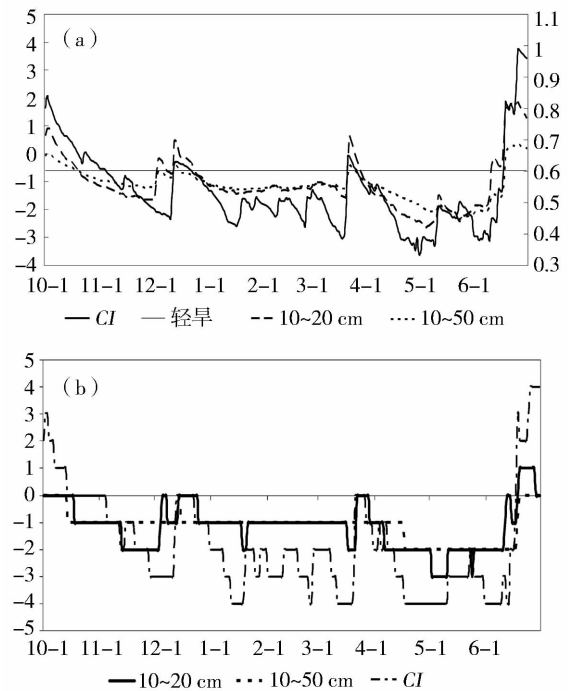


图9 CI 指标与1~20 cm、1~50 cm

土壤相对湿度指标(a)及各指标旱涝等级(b)

Fig. 9 The drought index (CI), 1-20 cm, 1-50 cm soil relative humidity index (a) and drought grades (b)

6 小结

从2010年10月至2011年5月,长江中下游地区降水量持续异常偏低,发生了近60 a来最严重的冬春季连续旱。干旱持续时间长,波及范围广,多地受灾严重。

(1)从2010年12月至次年的春夏季,南京地区干旱情况严重。2010年10月为正常偏涝情况,10月底11月初开始干旱,一直持续至12月上中旬恢复到正常水平,期间气象干旱达到重旱,土壤干旱达到中旱。2011年1月开始再次干旱,气象干旱最重达特旱,而土壤干旱基本维持在轻旱,持续至同年4月份,旱情加重,气象干旱维持在重一特旱,土壤也达到了重旱,直至6月中下旬干旱才得以解除。

(2)根据发生有效降水的时间,将2010年10月至2011年6月划分为6个时段。根据10~100 cm各深度土壤水分含量的变化情况,将其划分为表层(10 cm、20 cm、30 cm)、中层(40~60 cm)、过渡层(80 cm)及深层土壤(以100 cm作为代表)进行分析。其土壤水分变化整体趋势表现为:过渡层及其上土壤层的水分含量在第一个时段均表现为下降趋势,第二时段即2010年底至2011年3月中下旬,

水分含量基本维持在一定水平,期间过渡层在2月中期水分含量有一明显降低;2011年3月底4月初开始,各层土壤水分含量降低速率快,且下降幅度与之前相比明显增大;6月份转为上升趋势,进入第6个时段后水分含量均维持在较高水平。深层水分含量整体上也表现出微弱的先下降后上升的趋势,但除在5月上中旬出现一次相对较大的波动外,其余时间基本维持在36%左右。

(3) 不同土壤层对降水的响应时间及受影响程度均存在差异:表层土壤受降水影响程度最大且响应时间最短,在降水当日至其后1~2 d内水分升至最高,之后迅速下降;中层土壤对降水的响应时间及受影响程度由降水量的大小决定,降水量大小与响应时间呈反比,与影响程度呈正比;过渡层土壤水分对降水的响应与中层相似,但降水对其影响小;降水对深层土壤影响甚小。

(4) 气象干旱对土壤水分的影响是由上至下的,从第三时段中来看,表层土壤水分首先下降,5~8 d后中层土壤水分开始明显降低,持续下降约30 d后深层水分含量才有较明显的降低。但综合各时段的情况来看,干旱向下传递的时间与干旱的程度及前期干旱的影响等都所有联系,还有待进一步的研究。

(5) 气象干旱与土壤干旱变化趋势在整体上具有一致性,但干旱的具体过程存在不同:除第一次干旱开始时间外,土壤干旱比气象干旱滞后,干旱开始和缓解的时间均比气象干旱晚1~3 d;干旱程度上,气象干旱比土壤干旱严重,土壤表层干旱比中层严重;干旱渐进性上,表层土壤干旱在气象干旱达中旱5 d以上后才达到中旱,在气象持续特旱15 d后才降至重旱。而中层土壤在气象达特旱后才降至中旱。表层土壤水分降至最低点的时间比CI指数滞后5 d,10~50 cm土壤滞后约20 d。可见土壤干旱的发展比气象至少滞后5 d;对降水的敏感性上,土壤比气象响应慢1~3 d;干旱过程持续性上,中层土壤干旱持续性好于气象及表层土壤干旱。

(6) 当气象干旱持续达到一段时间后,会出现深层土壤向上补充水分的现象。在前面的讨论中,深层向表层补水前CI指数连续干旱日数为50~60 d,但由于资料限制,无法探讨其准确规律,此还有待于今后的进一步研究。

参考文献:

[1] 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.

- [2] 于琪祥. 对我国干旱及早灾问题的思考[J]. 中国水利,2003,4(A):67-69.
- [3] 赵鸿,李凤民,熊友才,等. 土壤干旱对作物生长过程和产量影响的研究进展[J]. 干旱气象,2008,26(3):65-71.
- [4] 汤章城. 植物对水分胁迫的反应和适应性 I. 抗逆性的一般概念和植物的抗涝性[J]. 植物生理学通讯,1983(3):24-29.
- [5] 邱扬,傅伯杰,王军,等. 土壤水分时空变异及其与环境因子的关系[J]. 生态学杂志,2007,26(1):100-107.
- [6] 王赛宵,李清河,徐军,等. 干旱半干旱地区土壤水分测定研究概述[J]. 山西农业科学,2010,38(9):89-92.
- [7] 秦鸿儒,付明胜. 连续干旱对土壤水分与植物存活影响调查研究[J]. 水土保持通报,2005,25(1):41-43.
- [8] 杨绚,李栋梁. 中国干旱气候分区及其降水量变化特征[J]. 干旱气象,2008,26(2):17-24.
- [9] 曹乃和,吴志伟,陈新育. 长江中下游沿江地区夏季旱涝分型及预测[J]. 气象,2003,29(9):37-41.
- [10] 孙燕,朱伟军,魏建苏,等. 江苏夏季旱涝异常的时空变化特征[J]. 南京气象学院学报,2008,31(5):723-730.
- [11] 李永康,陈方维,马开玉,等. 长江中下游夏季特大旱涝预测研究[J]. 水科学进展,2000,11(3):266-271.
- [12] 张琼,吴国雄. 长江流域大范围旱涝与南亚高压的关系[J]. 气象学报,2001,59(5):569-577.
- [13] 王文,蔡晓军. 长江中下游地区干旱变化特征分析[J]. 高原气象,2010,29(6):1587-1593.
- [14] 郑国光. 长江中下游旱涝形势演变及气象应急服务[J]. 中国应急管理,2011,7:17-19.
- [15] 李丽,申双和,李永秀,等. 不同水分处理下冬小麦冠层温度、叶片水势和水分利用效率的变化及相关关系[J]. 干旱地区农业研究,2012,30(2):68-72.
- [16] 张强,邹旭恺,肖风劲,等. 气象干旱等级. GB/T20481-2006, 中华人民共和国国家标准. 北京:中国标准出版社,2006:1-17.
- [17] 张强,高歌. 我国近50年旱涝灾害时空变化及检测预警服务[J]. 科技导报,2004,3(4):109-114.
- [18] Monteith J L. Evaporation and environment[J]. Symp Soc Exp Biol,1965,19:205-234.
- [19] 谷亚超,于利武,代庆. 干旱分类及常用计算方法概述[J]. 东北水利水电,2011,5:37-39.
- [20] WMO. Hydrology of Disasters[M]. WMO, Great Britain, Chippingham, 1989.
- [21] Riebsame W E, Changnon S A, Jr and T R Karl. Drought and Natural Resources Management in the United States, Impacts and Implications of the 1987-1989 Drought[M]. Westview Press, Boulder,1991.
- [22] 黄会平. 1949~2007年全国干旱灾害特征、成因及减灾对策[J]. 干旱区资源与环境,2010,24(11):94-98.
- [23] 徐国昌. 气象干旱讲座——干旱灾害与干旱减灾[J]. 甘肃气象,1990,4:38-43.
- [24] 陈晓燕,叶建春,陆桂华,等. 全国土壤田间持水量分布探讨[J]. 水利水电技术,2004,9(35):113-119.

Study on the Soil Moisture Change During Continuous Drought in Winter of 2010 and Spring of 2011 in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River

WANG Wen, DUAN Ying

(*College of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Key Laboratory of Meteorological Disaster of Jiangsu Province, Nanjing 210044, China*)

Abstract: The variation tendency of soil water content and the relationship between soil drought and meteorological drought were analyzed based on the daily and the real-time observed data at Nanjing from July 2010 to June 2011, and the meteorological drought composite index and the soil relative humidity index were calculated by using meteorological observations at Nanjing and daily precipitation, 10–100 cm soil moisture content at the experimental station constructed by Nanjing University of Information Science & Technology and Institute of Arid Meteorology, CMA. The results show that Nanjing suffered a severe dry weather in winter of 2010 and spring of 2011, on November 5, 2010, mild drought began to appear and changed to moderate drought on 12 Nov and severe drought on 28 Nov., and then maintained at moderate and severe drought. Soil relative humidity reached moderate drought on 13 November, after 15 days of continuous severe meteorological drought, the soil moisture reached severe drought on 2 May, 2011. The trends of meteorological and soil drought were basically consistent, but the extent of meteorological drought was more serious than that of soil drought, and the starting and ending time of soil drought lagged 1–3 days, and the drought development lagged behind more than 5 days. Weather and surface soil had higher sensitivity to precipitation, while the middle soil drought lasted long. In addition, when the meteorological drought duration reached 50–60 days, water would add from the deep layer to the top layer of soil.

Key words: lower reaches of Yangtze River; continuous drought in winter and spring; soil moisture