

专业气象服务

密云县冬小麦麦田土壤水分预报

裴步祥 毛飞

(气象科学研究院)

密云县位于北京城区的东北部。冬小麦是其主要的粮食作物之一。在冬小麦生育期内多年平均降水量为170.7mm，仅为冬小麦同期需水量的1/3，不能满足需求。因此，开展冬小麦生育期内的土壤水分情报和预报对农业生产是非常需要的。

土壤水分预报是农业气象预报的一个组成部分。按照土壤水分情报和预报来安排农业生产活动，如防治病虫害、灌溉、收获、储存等，可以做到合理用水，节省经费，减少损失，提高农业生产作业的效益。因此，土壤水分预报是气象为农业服务的重要手段，农田水利、气象等部门进行了广泛的研究，得出了很多结果^[1-3]。

1990年春季密云县降水量较历年平均值偏多，但水分仍不能满足要求。我们在冬小麦返青至收获期内试作了旬土壤水分预报，

张俊江 张德忠

(北京密云国家基准气候站)

并于5月中旬、6月上旬、6月下旬以旬报形式，发布了旬土壤水分预报，对冬小麦地的土壤水分和作物生长状况给出分析说明，提出农事活动的建议，取得了初步结果。

一、土壤水分预报方法

未来旬的土壤水分预报方法是采用水分平衡公式，来计算作物根区(0—100cm)和分层(0—30、30—50、50—100cm)的含水量。

水分平衡公式一般可表示为：

$$W_e = W_0 + P + I - E - B - R_o - D_r + G \quad (1)$$

式中 W_e 、 W_0 分别为旬末和旬初的土壤含水量； P 、 I 、 E 、 B 、 R_o 、 D_r 、 G 分别为旬降水量、灌溉量、蒸散量（土壤蒸发和作物蒸腾之和）、作物截留量、地表径流量、

渗漏量和地下水补给量。式中各项均以mm为单位。

密云县春季一般降水量和降水强度较小，冬小麦地段较平整，因而 $R_s \approx 0$ 、 $D_s \approx 0$ ；地下水位一般在5m以下，地下水补给量可忽略不计，即 $G \approx 0$ 。因此，(1)式简化为：

$$W_s = W_0 + P + I - E - B \quad (2)$$

除去作物截留量的降水量为有效降水量，也就是 $P' = P - B$ ，则式(2)为：

$$W_s = W_0 + P' + I - E \quad (3)$$

(3)式就是预报各层土壤水分的公式。为了得出旬末的土壤水分预报值，要对(3)式右端各项进行计算。其计算方法如下：

1. W_0 即旬初该土层的土壤含水量(mm)，用站上实测资料。气象站的土壤湿度观测值用干土重的百分比表示，为便于在水分平衡公式中进行计算，需要把它化为以mm为单位的值。对10cm土层的变换公式为：

$$W = W' \cdot D \quad (4)$$

式中 W 、 W' 为以mm和干土重百分比为单位的土壤含水量； D 为该层的土壤容量(g/cm³)。从每10cm土层含水量可累计得出0—30、30—50和50—100和0—100cm土层的含水量。

2. 作物截留量(B)的计算公式为：

$$B = LAI (1 - e^{-0.35M}) \quad (5)$$

式中LAI为叶面积指数； M 为降雨强度(mm/hr)。为计算简便，冬小麦的LAI可取近似值：越冬前和返青后为1，起身期为2，拔节期为3—4，孕穗及灌浆期为5。

3. 降水量和有效降水量。降水量用气象站的预报值。由于降水量预报有时误差较大，所以在文献[3]中就提出除按天气预报的降水量做土壤水分预报外，还要根据本站历年该旬的降水量资料，取一些可能降水量来计算做出土壤水分预报。

用降水量和作物截留量来得出有效降水量 P' 。为了做出分层的土壤水分预报，需要把有效降水量分层计算，得出它在0—30、30—50、50—100cm土层的补水量。

有效降水到达地面前向下渗透。对其渗透过程和渗透率的计算在[4、5]中给出了结果。我国北方春季土壤含水量较低，降水量和降水强度也较小，故其渗透深度等有不同的规律。我们曾利用华北平原春季降水的渗透观测资料，给出了其渗透深度的计算方法[6]。它给出当有效降水向下逐层渗透时，10cm土层的补水量为：

$$d = (AW'_H - W') \cdot D \quad (6)$$

式中 W'_H 、 W' 分别为10cm土层的田间持水量和土壤含水量，单位为干土重的百分比； A 为比例系数，其计算公式为：

$$A = 0.0403\bar{W}' + 0.153 \quad (7)$$

式中 \bar{W}' 为降水前渗透层的平均土壤湿度(干土重百分比)。

利用上式逐层计算得出它的补水量，累计得出渗透层内各分层的补水量。

4. 灌溉量(I)。根据密云县的灌溉制度，灌后各层土壤湿度接近或达到田间持水量，故10cm土层的补水量为：

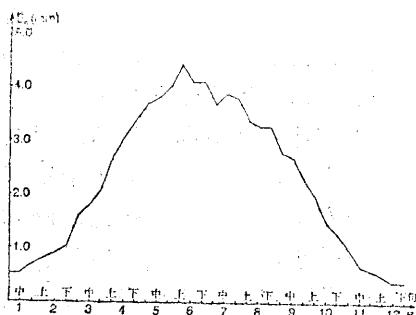
$$d' = (W'_H - W') \cdot D \quad (8)$$

式中符号意义同前。逐层计算后累计可得出各分层的补水量。

5. 实际蒸散量E。也是作物地段的耗水量，在水分平衡公式中是较复杂的项。为计算得出实际蒸散量E，按[7]中的方法首先计算可能蒸发量 E_0 ，然后再利用土壤和作物资料计算得出实际蒸散量E。

可能蒸散量 E_0 是用本站气候资料计算得出。密云站多年的旬平均可能蒸发量 \bar{E}_0 见附图。

在做土壤水分预报时，由于得不到计算可能蒸发量所需要的各气象要素未来旬的预报值。因而未来旬的可能蒸发量不能计算得出。根据对逐年的旬可能蒸发量的计算和分析得知：多年旬可能蒸发量的平均值 \bar{E}_0 与



附图 密云县多年旬平均可能蒸发量的逐旬变化

不同年份该旬的可能蒸发量 E_p 比较，其差异较小，一般不超过 E_p 的20~30%。因此，根据未来旬的天气预报和该旬的 E_p 值，来估算未来旬的 E_p 值⁽³⁾。

在得出旬可能蒸发量后，就可以计算旬实际蒸散量 E 。根据可能蒸发量的定义，它是在土壤充分湿润时大面积同类作物覆盖的农田水分损失量。如果把临界湿度(W_k)作为区分土壤充分湿润的标准，则当土壤湿度大于临界土壤湿度，即 $W \geq W_k$ 时的耗水量为：

$$(E_p)_j = E_p \cdot t \cdot \theta_j \quad (9)$$

$W < W_k$ 时则为：

$$(E_p)_j = (W_p - W_k)(1 - e^{-\frac{E_p \cdot t \cdot \theta_j}{W_k - W_p}}) \quad (10)$$

式中 E_p 为可能蒸发量(mm/d)； t 为计算时段(日数)； θ_j 为作物生育期 j 内的蒸散系数； W_p 为蒸发等于零时的土壤湿度。

W_p 在作物苗期(冬小麦拔节期前)取凋萎湿度 W_f ，主要发育期取最大吸湿度，其值为 $W_f/1.34$ 。

利用公式(9)或(10)计算不同层的蒸散量时，其中 θ_j 、 W_p 、 W_k 都应取计算层的值。例如计算0—30cm的实际蒸散量，应取0—30cm土层的 θ_j 、 W_p 和 W_k 值。对于分层的蒸散系数值，利用本站冬小麦地的土壤湿度和气候等资料，计算结果见表1。

表 1 冬小麦各发育期不同土层的蒸散系数

土层(cm)	发育期 播 种 — 越 冬	返 青 — 拔 节 抽 穗	拔 节 — 抽 穗 乳 熟	抽 穗 — 乳 熟 收 获
0~30	0.37	0.45	0.54	0.53 0.39
30~50	0.19	0.29	0.26	0.27 0.20
50~100	0.20	0.17	0.43	0.42 0.29
0~100	0.76	0.91	1.23	1.22 0.88

有关上述可能蒸发量和实际蒸散量的计算，请参阅文献[7]的有关内容。

二、土壤水分预报值的计算及举例

密云县气候站的土壤湿度观测地段，位于站附近的农民的冬小麦田中。冬小麦田面积大，较平整，田中有灌溉渠道，干旱时用水库水灌溉。由于水肥等条件较好，冬小麦亩产约为300kg左右。土壤湿度每旬观测一次，观测深度为0—100cm。

土壤多为沙壤土。各分层的田间持水量平均值(单位：干土重百分比)如下：0—30cm为21.0，30—50cm为22.0，50—100cm为24.1，0—100cm为22.8。土壤容重和凋萎湿度未测过，在计算中取近似值使用。

从1990年3月下旬试作旬土壤水分预报。下面以5月中旬土壤水分预报为例说明其计算方法。

1. W_p 为5月7日(应8日测定，因故提前)的土壤湿度测定值：0—30cm土层的含水量为60.9mm，30—50cm为44.3mm，50—100cm为124.4mm，0—100cm为229.9mm。

2. 降水量和有效降水量。据本站预报组预报5月中旬降水量比历年偏少，为3—5mm。如上述为了避免因降水量预报不准而影响土壤水分预报，除计算降水量为5mm时的土壤水分预报值外，还计算它为0、10、20mm时的土壤水分预报值。

为得出有效降水量，先计算作物截留量(B)。取冬小麦的 $LAI = 4$ ，降水强度 $M = 1$ ，代入(5)式得作物截留量为1.2mm。

降水量5mm时的有效降水量为3.8mm，一般情况下它的渗透深度不超过30cm，故不需要分层计算；降水量10、20mm时需分层计算。现以降水量20.0mm（有效降水量18.8mm）的分层计算举例如下：

有效降雨量18.8mm，降雨日期距5月7日较近，预计可能渗透到80cm。用5月7日的土壤湿度资料来计算降雨前0—80cm的平均土壤湿度 \bar{W}' 为：

$$\begin{aligned}\bar{W}' &= [(13.5 + 15.4) \div 2 + 15.4 + 17.0 \\ &\quad + 15.6 + 18.0 + 15.5 + 18.7 + \\ &\quad 19.6] \div 8 = 16.9\% \end{aligned}$$

$$\text{比例系数 } A = 16.9 \times 0.0406 + 0.153 = 0.84$$

各土层的补水量：0—10cm土层 $d_1 = (0.84 \times 20.7 - 14.5) \times 1.3 = 3.3$ (mm)。
其余土层的补水量(d_2, \dots, d_8)用同样方法得出。

由于0—80cm土层的累计补水量为19.9mm，已超过18.8mm的有效降水量，因此可知18.8mm有效降水量的渗透深度不超过80cm，说明预计的渗透深度与计算结果基本相符。因此用上述计算结果累计可得：0—30cm土层的补水量为7.9mm，30—50cm土层为3.5mm，其余7.4mm为50—100cm土层的补水量。

降水量为10.0mm（有效降水量8.8mm）时各土层的补水量如下：0—30cm土层为8.8mm，30—50cm土层为2.0mm。

3. 实际蒸散量 E 。首先根据附图中密云县5月上、中旬的可能蒸发量值，参考该旬预报的天气状况来确定 E 。根据气象预报，5月上、中旬天气状况接近常年的平均状况，故取5月上、中旬可能蒸发量的历年平均值为预报旬的可能蒸发量，即

$$E = [(3.7 \times 3) + (3.8 \times 8)] \div 11 = 4.2 \text{ (mm/d)}.$$

根据5月7日的土壤湿度实测资料，0—100cm土层的湿度为78%（指占田间持水量

的百分比，下同）。冬小麦等作物主要发育期的临界湿度为65%，因而可按式(9)计算未来旬的蒸散量，即 $(E_0)_t = 4.2 \times 0.54 \times 11 = 24.9$ (mm)，这是0—30cm土层的蒸散量。用同样方法可以求得30—50、50—100和0—100cm的蒸散量。

4. 土壤水分预报值。按水分平衡公式得出结果见表2。

表2 冬小麦地5月中旬（18日）
土壤湿度预报值

项 目 (mm)	土层 (cm)		0—30		30—50		50—100		0—100	
	降水 量 (mm)	土壤 湿度 (%)	占田 间持 水量 (%)	土壤 湿度 (%)	占田 间持 水量 (%)	土壤 湿度 (%)	占田 间持 水量 (%)	土壤 湿度 (%)	占田 间持 水量 (%)	
0	9.3	44	12.6	57	16.1	67	13.4	59		
5	10.3	48	12.6	57	16.1	67	13.7	60		
10	11.0	52	13.3	61	16.1	67	14.0	62		
20	11.4	54	13.9	63	17.2	71	14.8	65		

分析表中的资料，如中旬按天气预报降水3—5mm，旬末1m土层的湿度预报值为60%，0—30、30—50cm土层将出现较重的干旱，影响冬小麦的生长和产量。如本旬降水10—20mm，旬末1m土层的湿度预报值为62—65%，土壤湿度比旬初约低3%（干土重百分比），0—30cm土层低于适宜土壤湿度，也将出现旱象。因此，需注意抗旱蓄水保墒，适时灌溉，以保证冬小麦的正常生长。

三、效果

预报值与实况比较：5月7—18日降雨量0.1mm，比天气预报值低。由于本旬干旱，5月16日灌溉。灌溉量无实测值，经估算灌溉补水量为66.8mm，并计算出0—30、30—50和50—100cm土层的补水量。土壤湿度预报值与5月18日的实测值比较如下（表3）。

由表3可见，各层土壤湿度预报值的误差不超过10%，计算结果是比较准确的。灌

表3 土壤温度预报值与实测值比较
(单位: mm)

土层(cm)	0—30	30—50	50—100	0—100
预报值	58.1	45.3	137.2	241.0
实测值	64.4	44.1	132.1	240.6
差 值	-6.3	1.2	5.1	0.4
相对误差(%)	-9.8	2.7	3.9	0.1

溉后的冬小麦田保持了适宜土壤湿度，保证了作物的正常生长。

除上述外，从3月下旬至6月中旬都计算了土壤湿度预报值，共9旬36个不同土层的水分预报值与实测值是比较接近的，其相对误差为5.2%，最大相对误差为21.2%，可见计算的土壤水分预报值能满足农业生产的需要。

从表2中不同土层的温度预报值可以看出：0—30cm的温度较低，50—100cm的温度较高，它们的差别是比较明显的，这与土壤温度的垂直分布规律是一致的。因此，土壤温度的分层预报是必要的，特别是干旱季节和作物苗期，耕作层的作用较大，如果预报仅给出1m土层的温度平均值，它往往与耕作层的温度相差较多，给农业生产造成许多困难。

密云县位于季风气候区，春季干旱少

雨，而这时正值冬小麦需水关键期，虽然有水库蓄水灌溉，但水资源不足，水库蓄水量也日趋下降，因而合理和节约用水是一个急待解决的问题，我们做出的土壤水分情报和预报，为此提供了条件和依据。按照土壤水分情报和预报资料及各种作物的适宜土壤湿度指标，能适时适量地进行灌溉，避免水资源的浪费，所以土壤湿度的情报和预报是农业节水的一个有效手段。

参 考 文 献

- [1] 卢玉邦，土壤水分预报模型的研究，土壤学报，Vol.26, No.1, 1989。
- [2] 朱自强等，冬小麦水分动态分析和干旱预报，气象学报，Vol.46, No.2, 1988。
- [3] 裴步祥，华北平原地区土壤水分和干旱的预报方法，农业气象预报文集，气象出版社，1983。
- [4] D·希勒尔著，土壤和水，华孟、叶和才译，农业出版社，1981。
- [5] F.W.T.彭宁德弗里斯等著，植物生长与作物生产的模拟，王馥棠等译，科学出版社，1988。
- [6] 陶祖文、裴步祥，华北平原春季降水渗透深度和“透雨”的农业气象估算方法，气象学报，Vol.41, No.1, 1983。
- [7] 裴步祥，蒸发和蒸散的测定与计算，气象出版社，1990。