

喷灌麦田越冬水热状况及旱冻灾害防御途径初探^①

秦志生 卢志光^② 陈琳

(中国农业大学资源与环境学院)

摘要 通过1996~1997小麦越冬试验,研究了北京地区喷灌麦田越冬期间0~60 cm土壤水分及小麦分蘖节(2 cm)深度处土温变化规律,并分析了影响土壤冻深的因素。本文在田间试验的基础上,总结了喷灌补水时期的确定原则,并首次提出补水量的估算公式。

关键词 冬小麦;越冬;水热状况;旱冻;喷灌

分类号 S421

Study on Water and Heat Condition in Sprinkler Irrigated Overwintering Wheat Field and Preventive Approaches for Drought-freezing Injury

Qin Zhisheng Lu Zhiguang Chen Lin
(College of Resource and Environmental Sciences, CAU)

Abstract Soil moisture fluctuation in the layer of 0~60 cm and soil temperature at depth of tiller node (2 cm) were investigated for overwintering winter wheat and the factors influencing soil freezing depth during overwintering period in 1996~1997. Based on field experiments, the principles to determine date and time of supplementing water by sprinkler irrigation in early spring were discussed, and an equation to estimate the quantity of supplementary water was suggested for the first time.

Key words winter wheat; overwintering; water and heat condition; sprinkler irrigation; drought-freezing injury

冬小麦越冬冻害是影响北京地区粮食生产稳产高产的一个重要因素^[1]。近20年来,我国冬季变暖的趋势很明显,而且这种变暖趋势可能持续到下个世纪^[2,3]。虽然暖冬的出现有利于冬小麦安全越冬,从全国来看冬小麦越冬冻害有所减轻。但小麦冻害在北京地区却更加频繁(中等以上的冻害5年二遇,严重冻害7年一遇),给农业生产带来了巨大损失。

分析北京近20年来越冬期间发生冻害的典型年份不难发现,80年代以前,越冬冻害以冷冬型为主,发生的原因是冬季持续严寒或秋季剧烈降温;80年代以来,北方普遍变暖,越冬冻害以融冻型和早冻型为主。暖冬年北京地区冬小麦冻害发生除了品种抗寒性降低的原因外,与近年来在北京推广了喷灌后防冻保苗技术不配套也有关系。由于喷灌条件下冻水量往往不足,喷灌麦田土质疏松,北京冬季风多雪少,麦田跑墒而发生旱冻,暖冬年这种情况更为严重。

收稿日期: 1998-02-25

①国家自然科学基金资助项目 39770423

②卢志光,北京圆明园西路2号中国农业大学(西校区),100094

喷灌麦田旱冻成因是表层的干旱,所以防御旱冻应从消除地表干土层着手,减小表土变温幅度。由于喷灌水量易于控制,表层补水效果好,补水后表土温度变幅减少,利于抵御旱冻,因此,按气候特点正确运用喷灌技术不失为防御旱冻的一种有效措施。近年来,北京部分地区已开始实施早春喷灌补水防御旱冻,但补水量和补水时期往往是按经验估计的,缺乏理论依据。鉴于此,本试验研究了越冬期与旱冻发生密切相关的喷灌麦田浅层土壤水热状况,并初步进行喷灌补水防御旱冻补水时期和补水量的确定。

1 试验设计

1996~1997年冬小麦旱冻试验地在农大科学园内,1 m 土壤质地为轻壤土 0~10 cm 土壤容重为 $1.08 \sim 1.2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,田间持水量为 0.33,1996年冬灌量为 36 mm。试验地面积 21 m²,共分 3 个播期 1996-09-25,10-07 和 10-19;土壤肥力中等,播种时水分状况良好。供试品种为 9516,3 个播期的播量分别是 10,14,18 kg。播种行间距 20 cm。

为了防止土壤水分侧渗,破坏相邻小区不同的水分处理效果,冬前用地膜将小区隔离,地膜敷设深度为 30 cm。小区划分及处理安排(表 1)。本试验中使用 TL 型热敏电阻测温元件,根据需要敷设在距地表 2 cm 的土壤中(靠近麦丛)。另使用一电阻量程 $0 \sim 2 \times 10^4 \Omega$ 的万用电表,最后将测定的电阻值换算成温度值。

表 1 小区划分及各处理安排

小区处理说明	播期 1 (1996-09-25)	播期 2 (1996-10-07)	播期 3 (1996-10-19)	备注
隆冬补水 1996-12-25	B(1 m ²)	F(2 m ²)		补水前干土层厚 2 cm
早春补水 1997-02-21	C(2 m ²)	E(2 m ²)	I(2 m ²)	补水前干土层厚 4 cm
早春补水 1997-03-05	D(2 m ²)	G(2 m ²)	J(2 m ²)	补水前干土层厚 6 cm
不补水	A(2 m ²)	H(1 m ²)	K(3 m ²)	干土层厚 6 cm
大田对照	I	II		

2 结果和讨论

2.1 越冬期喷灌麦田水热状况分析

2.1.1 0~60 cm 土壤含水量变化分析 从越冬及早春喷灌麦田土壤含水率的变化过程(图 1)可见,1996-12-03 灌冻水后,12-04 观测到的 0~20,20~40,40~60 cm 三个土层内的土壤含水率均显著增加。0~20 cm 土壤含水率 1996-12-17 的观测值达最大值,这是由于下层土壤水分向冻结锋面迁移所致(12-17 土壤冻结深度为 18 cm)。此后由于土壤蒸发及下层冻结深度的增加,该层含水率逐渐下降。1997-02-16,测值又显著回升,这是因为上层土壤开始解冻,水分向上渗透。此后由于气温上升,土壤蒸发变大,0~20 cm 土壤含水率下降。20~40 cm 土层内的土壤含水率从 1996-12-27 日的观测值开始增加,到 1997-01-31 达最大值,对应的土壤冻结深度这一时期达最大值 42 cm。同天观测到的 0~20 cm 和 40~60 cm 土壤含水率却是最小值,说明土壤水分向冻结锋面迁移的特点很显著。40~60 cm 土壤含水率从灌冻水(1996-12-

03)后逐渐下降,1997-02-26 其后的测值有所回升,这是由于土壤解冻过程中,上层冻结的土壤水分解冻后因重力向下运移的结果。

2.1.2 越冬期麦田分蘖节(2 cm)处土壤温度观测结果的分析 在冬小麦整个越冬期间,麦苗分蘖节处(近年来在北京地区约 2 cm 左右)土壤温度和小麦安全越冬的关系最为密切^[3]。而气象台站常规土温仅有 0, 5, 15, 20 cm 的观测记录,不能准确反映小麦越冬的温度条件。由于气象台站提供的温度预报为气温预报,为了分析分蘖节温度与气温的关系,以期将来建立分蘖节温度的预报方程,试验中设置了不同处理 2 cm 土温最高最低值的观测。

1996~1997 小麦越冬期及早春分蘖节深度的最低土温及当日的最低气温变化(图 2)显示,分蘖节深度的最低土温的变化趋势与最低气温相一致,并且处于干土层内分蘖节深度的土温值大都低于最低气温值(个别点除外),而大田对照中分蘖节深度的土温值均高于最低气温值,这是由于大田对照中浅层土壤含水率大于处理 a 中的浅层土壤。这又从另一个侧面说明了浅层土壤水分状况对小麦安全越冬的重要影响。由于分蘖节深度的最低土温和最低气温存在较好的相关关系,笔者尝试建立了分蘖节深度最低土温 $t_{s,\min}$ 和最低气温($t_{k,\min}$)的关系式:

$$\text{分蘖节处在干土层内(观测点数:10): } t_{s,\min} = 0.9624 t_{k,\min} - 0.3259 \quad (1)$$

$$R^2 = 0.9748$$

$$\text{大田对照(观测点数:10): } t_{s,\min} = 0.6993 t_{k,\min} + 0.1832 \quad (2)$$

$$R^2 = 0.9354$$

对关系式(1)和(2)进行 F 检验,对于信度 $\alpha = 0.01, F_{0.01} = 10.0$, (1)式的计算值 $F = 389.654$, (2)式的计算值 $F = 115.828$, 均远远大于 $F_{0.01}$, 表明线性关系极显著。因此,对于北京地区喷灌麦田,越冬期小麦分蘖节深度的土温最低值和最低气温可用简单的线性关系表示。不同水分状况的浅层土壤,式中各系数将相应改变。

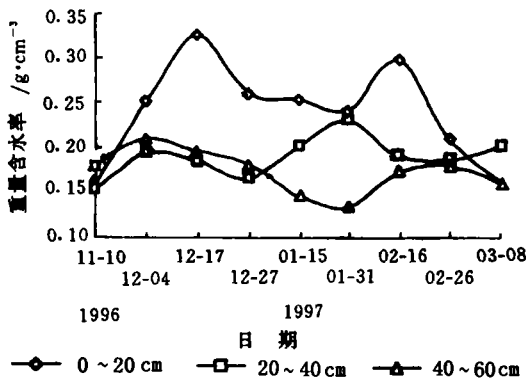


图 1 越冬期麦田 0~60 cm 土壤水分变化

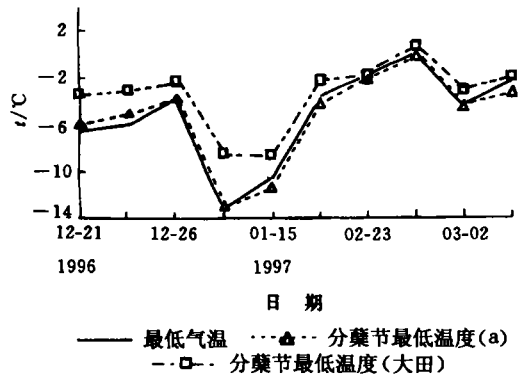


图 2 分蘖节最低温度与最低气温的关系

2.1.3 土壤冻结过程的分析 北京地区属于季节性冻土区,当冬季温度下降到一定程度就会出现冻结现象。土壤冻结过程可分为不稳定冻结和稳定冻结两个阶段^[7]。在日平均气温稳定通过 0℃之前,一般是不稳定冻结,土壤日消夜冻,冻深较小。日平均气温稳定通过 0℃之后,进入稳定封冻阶段。图 3 表示了试验点 1996~1997 越冬期麦田冻结过程。

尚松浩等人^[4]研究了北京地区冬季土壤冻深和负积温的关系,并建立了线性关系式。但根据笔者 1996~1997 年冬季冻深的实测结果,发现气温稳定通过 0℃以后,冻深并非一直增加,

在回暖的时期,冻深反而减少(图3)。因此,冻深和负积温的关系并非线性关系。在暖冬年,冻深的变化还应考虑回暖天气的影响,比如越冬期的正积温。为此,笔者根据实测值,建立了冻深 h_t 与越冬期负积温(\sum_{-t})和正积温(\sum_{+t})的回归方程式:

$$\text{未冬灌地(观测点数:9)}; h_t = 17.0869 + 0.1972 \sum_{-t} + 0.2832 \sum_{+t}, \quad (3)$$

$$R^2 = 0.9709$$

$$\text{冬灌地(观测点数:9)}; h_t = -25.1146 + 0.2361 \sum_{-t} + 0.4548 \sum_{+t}, \quad (4)$$

$$R^2 = 0.9829$$

对于上二式进行F假设检验;对于 $\alpha = 0.01$ 的信度,(3)式的F计算值为66.837, $F_{0.01} = 8.02$, F计算值 $> F_{0.01}$, 回归关系极显著;(4)式的F计算值为57.346, $F_{0.01} = 8.65$, F计算值 $> F_{0.01}$, 回归关系极显著。需要说明的是由于(3)式和(4)式考虑了前一年初冬气温稳定通过0℃至翌年彻底解冻日的正积温,此二式不但反映了土壤冻结过程,也反映了土壤解冻过程。

2.1.4 越冬期喷灌麦田水热状况的结论和讨论

①越冬初期,由于冻深较浅,0~20 cm土壤水分含量较大,之后由于土壤冻深的增加,另一方面,由于表层土壤蒸发消耗,该层土壤水分含量逐渐减小,直至早春解冻后又开始增加。越冬期随着冻深的增加,水分不断向冻结锋面迁移,20~40 cm土壤水分逐渐增大,到冻深最大日期出现最大值,而后减小。越冬期40~60 cm土壤水分含量一直呈下降趋势,到早春解冻开始后,才有所增加。

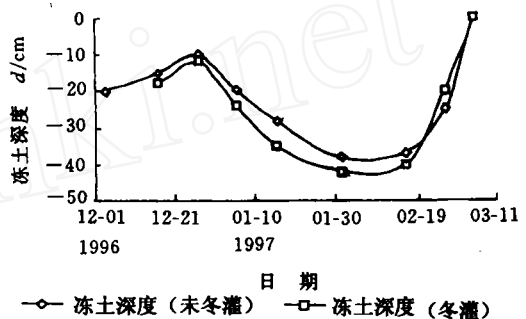


图3 1996~1997冬季冻土深度变化

②越冬期冬小麦分蘖节深度的最低土温 $t_{s,\min}$ 是判定和预报作物冻害的一个重要指标,它和日最低气温(t_{\min})关系很密切。它们的关系可用线性方程 $t_{s,\min} = at_{\min} + b$ 表示, a, b 为经验系数,随观测深度土壤的水分状况和土壤结构及质地等物理属性的变化而变化。

③在土壤稳定冻结阶段,冻深并非线性增加,遇到回暖天气,冻深可能减小,在暖冬季节,这种现象很明显。本研究采用越冬期的负积温和正积温二因子,建立了整个越冬期冻深(h_t)变化的二元回归方程式: $h_t = a \cdot \sum_{-t} + b \cdot \sum_{+t} + c$, a, b, c 为经验系数,随土壤的物理特性变化而变化。对于冬灌地,冻深发展比未冬灌地快,最大冻深也较大,在土壤融冻阶段,融冻速度也较未冬灌地快。

2.2 喷灌补水对防御冬小麦早春早冻的分析

2.2.1 补水时期和补水量的确定

喷灌补水目的是通过消除干土层,平抑2 cm土温的变化和提高最低温度来防御早冻。为此,笔者安排了隆冬补水试验(表1)和早春补水试验(表2),通过对比不同时段大田对照和补水处理小区2 cm土温,研究不同时段补水对小麦生长的影响。

试验证明,隆冬补水,2 cm土温的最低温度普遍比大田对照低1.5~4.4℃,最高温度比大田对照低0.3~1.5℃,这就违背了补水防御早冻的初衷。而早春补水(表1),日平均气温已在0℃以上,平抑土温的效果较显著。由此可知,在日平均气温小于0℃的隆冬季节补水防御早冻,有弊而无利。喷灌补水的时期应选在日平均气温0℃左右,且其后不再出现较长时段日

平均气温低于 0℃ 的天气为宜。在北京近年暖冬情况下, 这种天气一般出现在 2 月中旬至 3 月上旬。

表 2 不同时段补水 2 cm 土温观测

项 目	1996-12-25 补水					1997-02-21 补水					
	1996-12-28	-01-02	-01-07	-01-15	1997-01-25	-02-22	-02-23	-02-26	-03-02	-03-03	
2 cm 最低土温	补水处理	-4.1	-8.3	-11	-10.2	-10.3	-0.2	-0.9	0	4.5	5.3
	大田对照	-2.6	-3.9	-8.8	-8.6	-7.9	-1.2	-1.9	0	-3.1	-2.0
2 cm 最高土温	补水处理	0.8	-1.7	-1.8	-1.4	4	3.8	7.7	2.9	7.6	9.8
	大田对照	1.3	-1	0.1	-1.1	4.3	4.1	6.8	3.3	7	9.9
							4	8.6	2.9	3.1	4.5
							5.3	8.7	3	10.1	11.9

2.2.2 补水量的计算 根据前人关于喷灌补水的研究^[3], 补水量应以使干土层刚刚消失为宜, 不能出现积水, 但具体定量的指标尚未得出。笔者尝试结合越冬期麦田干土层厚度, 0~10 cm 土壤容重, 田间持水量来估算喷灌补水量(表 3)。估算公式推导如下:

$$\theta = m_{s,w} / m_s \quad (5)$$

$$m_{s,w} = \theta \cdot m_s \quad (6)$$

$$m_s = V \cdot \rho \quad (7)$$

由(6)和(7)式得:

$$m_{s,w} = \theta \cdot V \cdot \rho \quad (8)$$

由

$$V = S \cdot h \quad \text{得} \quad m_{s,w} = \theta \cdot S \cdot h \cdot \rho \quad (9)$$

式中, $m_{s,w}$ ——土壤水分质量(g); m_s ——土壤干重(g); V ——土壤容积(cm^3); θ ——小数表示的土壤重量湿度, 在此以田间持水量的 80% 代替; ρ ——0~10 cm 的土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); S ——补水面积(cm^2); h ——干土层厚度(cm)。

由于规定补水后土壤湿度为田间持水量的 80%, 那么计算补水量时应考虑田间持水量减去补水前干土层的土壤含水率, 因此:

$$W_a = (\theta - \theta_1) \cdot S \cdot h \cdot \rho \quad (10)$$

式中, W_a ——补水量; θ_1 ——干土层内的土壤湿度。

笔者测定 1996 年冬前和 1997 年早春农大科学园 0~10 cm 的土壤容重, 平均为 $1.08 \sim 1.2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 取其近似值 $1.1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; 同时取得科学园田间持水量数据为 $W = 0.30$ 实测干土层的土壤湿度为 5.8%, 对于干土层厚度分别为 2 cm, 4 cm, 6 cm, 小区面积分别为 1 m^2 , 2 m^2 , 3 m^2 , 根据(10)式, 补水量分别是 4.0 kg, 16.0 kg, 24.0 kg。根据计算量补水后, 发现小区内干土层已消失, 并且无积水痕迹, 通过验证, 说明用(10)式估算补水量, 效果较好。

对于生产中大面积的喷灌补水量, 一般用 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 计算, 可将(10)式改写为:

$$V = 6.67 h \cdot (\theta - \theta_1) \cdot \rho \quad (11)$$

通过(11)式, 可方便地计算出补水量。假定需喷灌补水的麦田的土壤物理特性同于农大科学园, 应用(11)式可以得出不同干土层厚度每平方米的喷灌补水量(表 3)。

2.2.3 喷灌补水对防御冬小麦早春早冻的结论和讨论

(1) 早春季节, 适时适量的喷灌补水可显著地平抑 2 cm 土温变化, 提高分蘖节深度最低

温度,有利于越冬后期和返青期小麦的安全生长。对越冬期间少雨雪,干土层较厚的麦田,是一种值得推广的防御旱冻的管理措施。

(2)对喷灌补水时期的选择,一般要求在日平均气温 0°C 以上,并且其后不再出现较长时期的强低温天气为宜。这种天气一般在2月中旬至3月上旬。由于笔者试验数据和年限所限,该结论仅供参考。

(3)对补水量的确定按公式 $V=6.67h\cdot(\theta-\theta_1)\cdot\rho$ 计算得出。 V :每平方米补水量(m^3); θ :补水地块田间持水量的80%; θ_1 :干土层内的土壤湿度; h :补水地的平均干土层厚度(cm); ρ :补水地0~10 cm土壤容重。

喷灌补水是针对冬小麦早春麦田干土层加厚,易受旱冻实施的一项管理措施。一般认为3 cm以下的土层对小麦威胁不大,一般通过压麦提墒缓解;干土层到3 cm以上,可酌情进行喷灌补水。对于干土层较厚,如6 cm以上,麦苗受旱冻威胁严重的麦田,应提早补水,但必须慎重确定补水期和具体补水时间并根据中、短期天气预报,密切注意天气变化,把握补水的有利时机。

表3 喷灌麦田补水量(参数值)

平均干土层厚度 h/cm	补水量 $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}(\text{mm})$
3	60.0 (6.0)
4	77.5 (8.0)
5	99.0 (10.0)
6	120.0 (12.0)
7	139.5 (14.0)
8	159.0 (16.0)

参 考 文 献

- 1 郑大玮,龚绍先. 冬小麦冻害及其防御. 北京:气象出版社,1985
- 2 郑大玮,刘中丽. 小麦抗旱防冻增产技术. 北京:农业出版社,1992
- 3 郭文利,刘保存. 冬小麦早春补水试验效果分析. 北京农业科学,1996,14(2):10~12
- 4 尚松浩,雷志栋,杨诗秀. 越冬期田间水热状况的试验研究. 节水农业应用基础研究进展,1995
- 5 郑大玮,刘中丽. 气候变化对小麦生产的影响. 气候变化对中国农业的影响. 北京科学技术出版社,1995
- 6 赵宗兹. 人类活动与温室气体增加对全球和中国气候变化的影响,气候变化对中国农业影响. 北京科学技术出版社,1995
- 7 李天杰. 土壤物理学. 北京:人民教育出版社,1982