

# 晚霜冻害对黄土区苹果树水分利用能力的影响

党宏忠<sup>1\*</sup>, 冯金超<sup>1</sup>, 董瑞香<sup>2</sup>, 却晓娥<sup>1</sup>, 王檬檬<sup>3</sup>, 张金鑫<sup>4</sup>

(1. 中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091; 2. 甘肃省安定区林业和草原局, 甘肃 定西 743000;  
3. 内蒙古农业大学沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 4. 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091)

**摘要:** [目的] 通过对比研究, 明确晚霜冻害对苹果树生长季水分利用能力影响的程度与机理。 [方法] 利用热扩散技术 (TDP) 对黄土区苹果树未发生霜冻年和霜冻年主要生长季边材液流速率 ( $J_s$ ) 开展连续监测, 并同步观测净辐射 ( $R_n$ )、气温 ( $T_a$ ) 等气象因子, 计算大气水分亏缺 (VPD) 等变量。通过对比、相关分析阐明晚霜冻害对苹果树水分利用能力的影响。 [结果] 霜冻发生后, 当日午间液流速率最大值 ( $J_{s-max}$ ) 比霜冻前数日内的最大值降低 9%~27%, 苹果树水分利用能力 ( $J_{s-max}/VPD$ ) 在霜冻后的数日内连续下降。霜冻后当年 (2018) 生长季平均液流速率比未发生霜冻年 (2017) 同期下降 35%。在整个生长季内, 液流速率日平均值 ( $J_{s-mean}$ ) 与  $R_n$ 、VPD 均具有显著的指数关系, 但在相同的  $R_n$  或 VPD 水平下, 霜冻年的  $J_{s-mean}$  显著低于未发生霜冻年。 [结论] 严重低温霜冻和霜冻后快速升温共同导致了苹果树生长季水分利用能力的显著下降。研究结果为认识霜冻对苹果树水分生理的影响机制提供了理论支撑。

**关键词:** 霜冻; 液流速率; 大气水分亏缺; 净辐射; 苹果树; 黄土高原

**中图分类号:** S718.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-1498(2019)04-0137-07

霜冻是指气温突然降至 0℃ 以下, 引起果树幼嫩部分 (如花、幼叶或幼果) 遭受严重冻害的现象, 一般分为早霜冻 (秋霜冻) 和晚霜冻 (春霜冻), 以晚霜冻的危害性更大<sup>[1-2]</sup>。早春 (4 月上旬), 随着气温的上升土壤已完全解冻, 经历了休眠期的果树其树液开始流动、传输, 花芽随之经历萌动、膨大及展放的过程。此时, 花器官对低温非常敏感, 如果恰逢剧烈降温, 正处在花蕾、初花期、盛花期甚至坐果期的果树均可能遭受严重冻害, 发生花芽脱落、花瓣干枯、雌 (雄) 蕊干缩褐变、幼果停止膨大或落果等严重变化<sup>[3-5]</sup>。

2018 年 4 月 6 日晚到 7 日早发生在北方大部分地区近 50 年不遇的霜冻, 涉及地域面积广 (如陕西、山西、宁夏、甘肃、河北、河南、安徽等省)<sup>[6-8]</sup>, 仅山西省受灾面积在 99% 以上<sup>[9]</sup>。这次霜冻气温下降幅度达 20~36℃, 最低温度降至 -10~-1.8℃, 低温持续 5~9 h, 使正值花期的苹果等多种果树遭受大范围的冻害, 损失严重, 部分地区甚至绝收<sup>[9]</sup>。

果树遭受霜冻低温胁迫后, 除了对花的最直接最直观的破坏外, 对其它器官如幼叶、幼枝的生理过程也会产生影响, 如叶缘变色、叶片发软, 甚至干枯, 导致果树自身生理过程发生变化<sup>[10]</sup>。水分是果树整个生理周期中最重要、不可或缺的资源之一。因此, 在个体尺度上探讨霜冻对果树水分需求过程的影响, 对于更全面地认识果树生理对低温干扰的响应机理、探寻更全面有效的防 (抗) 寒措施都有重要意义。

树木边材液流监测是表征树木蒸腾过程、诊断树木水分状况的有力工具<sup>[11-12]</sup>。液流速率的测定对于研究树木个体的生物学结构、水分利用特征及其对环境变化的响应具有重大意义<sup>[13-15]</sup>。为此, 本研究通过对苹果树在未发生霜冻年 (2017 年) 和霜冻年 (2018 年) 主要生长季 (5—9 月) 期间边材液流速率的连续测定 (每小时), 比较分析了特大霜冻对苹果树蒸腾用水过程的影响, 并结合对同期环境要素的监测, 揭示了特大霜冻发生、加剧危害的气象条

收稿日期: 2019-03-18 修回日期: 2019-04-18

基金项目: 国家重点研发计划“黄土残塬沟壑区水土保持型景观优化与特色林产业技术及示范” (2016YFC0501704)

\* 通讯作者: 党宏忠, 副研究员, 主要从事生态水文研究. E-mail: hzdang@caf.ac.cn

件特征及对苹果树蒸腾过程的影响。本研究对于认识果树水分生理过程对霜冻的响应机理,并制定果园有效的防霜冻管理措施提供重要理论依据。

## 1 研究区概况

研究区选择在属于黄土残塬沟壑区的山西省临汾市吉县东城乡雷家庄苹果种植示范园(110°35.655' E,36°04.739' N),海拔 910 m,该地区年均气温 10.2℃,年均日较差 11.5℃,年均降水 522.8 mm,≥10℃有效积温 3 361.5℃,霜期年平均 172 d,多年平均日照时数 2 538 h,属暖温带大陆性季风气候,春季干旱多风,夏季降雨集中<sup>[16]</sup>。所选样地为 2000 年建植的面积为 1.7 hm<sup>2</sup> 的苹果园,品种为红富士,果树生长健壮,树体长势整齐,修剪量适中,栽植密度 4 m×6 m,平均年产量 2.0 t·hm<sup>-2</sup>。果园布设有防雹网,经营管理技术完备(施肥、修剪、人工授粉、生草覆盖、铺设反光膜、套袋、病虫害防治等),果树处于经济成熟期,生长良好。在这次特大霜冻害中,吉县受灾面积 1.85 万 hm<sup>2</sup>,占苹果总栽培面积的 99.3%<sup>[9]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 气象要素的监测

在试验林分内架设包括 7 个要素的小型气象站(空气温湿度 AV-10TH;风速传感器 AV-30WS;风向传感器 AV-30WD;大气压力传感器 AV-410BP;净辐射传感器 NR-LITE2;土壤热通量传感器 HFP01;雨量传感器 AV-3665R),其中,AV 系列传感器来自于美国 Avalon 公司,NR 系列传感器来自于荷兰 Kipp & Zonen 公司,土壤热通量传感器来自于荷兰 Hukseflux 公司,数采器为 SQ2020(Grant,英国)。所有传感器(除土壤热通量外)均通过主杆与支架安装在果树冠层以上(离地面约 3 m 处)。采样、记录间隔分别为 10、30 min。

大气水分亏缺(VPD)的计算公式<sup>[17]</sup>为:

$$VPD = 0.611e^{\left(\frac{17.502T_a}{T_a+240.97}\right)}(1 - RH)$$

式中: $T_a$  为气温(℃), $RH$  为空气湿度(%)。

潜在蒸发散( $ET_0$ , mm·d<sup>-1</sup>)的计算公式为:

$$ET_0 =$$

$$0.408 \frac{\Delta(R_n - G) + \gamma \times \frac{900}{T_a + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

$$\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)$$

式中: $R_n$  为净辐射(MJ·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>), $G$  为土壤

热通量(MJ·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>), $T_a$  为气温(℃), $u_2$  为换算到 2 m 高处的风速(m·s<sup>-1</sup>), $e_s$ 、 $e_a$  分别为饱和水汽压和实际水汽压(kPa), $\Delta$  为饱和水汽压曲线斜率(kPa·℃<sup>-1</sup>), $\gamma$  为干湿表常数(kPa·℃<sup>-1</sup>)。

### 2.2 树干边材液流速率的监测

选定 3 株冠形完整、生长健康的果树(17 a)为试验样株,样株基本情况见表 1。采用热扩散传感器(Plantsensor,澳大利亚)实时监测果树树干边材的液流速率。该传感器由上下 2 根探针组成,其中,上部探针为加热探针。每个样株分别在东、南、西、北 4 个方位(根据手持罗盘仪确定)各安装 1 套(TDP-3cm),传感器连接 32 通道 SQ2040 数采器(Grant,英国)。采样、记录间隔分别为 10、30 min。采用 100 W 多晶太阳能板接 12V-100AH 铅酸蓄电池连续供电。TDP 安装过程及技术要点见文献[18-19]。液流速率( $J_s$ , cm·h<sup>-1</sup>)的计算采用 Grani-er<sup>[20]</sup>公式:

$$J_s = 119 \times 10^{-4} \left( \frac{\Delta T_0 - \Delta T}{\Delta T} \right)^{1.231} \times 3\ 600$$

式中: $\Delta T$  为上下探针间实际温差(℃), $\Delta T_0$  为液流为零时上下探针间的温差(最大值,℃),该值采用两次回归法确定<sup>[20-21]</sup>。

表 1 样株基本情况

Table 1 Information of sample trees

样株 Samples	胸径 DBH/cm	树高 Height/m	冠幅 Crown width (南-北)×(东-西) S-N×E-W/(m×m)
T1	20.2	2.4	4.2×4.0
T2	21.5	2.5	4.4×4.2
T3	20.1	2.4	4.1×4.0

### 2.3 数据分析

每一样株在 4 个方位的液流速率  $J_s$  (cm·h<sup>-1</sup>) 值分别进行平均作为该株的平均液流速率 (cm·h<sup>-1</sup>)。  $J_s$  与 VPD,  $J_s$  与  $R_n$  间的关系均采用指数函数:  $y = a - bc^x$  ( $a, b, c$  均为参数) 进行拟合。不同时段液流速率均值间差异的比较采用单因素方差分析方法 (One-way ANOVA) 在统计软件 OriginPro2017 中完成。

## 3 结果分析

### 3.1 特大霜冻的发生过程及特征

特大霜冻发生在 2018 年 4 月 7 日凌晨。4 月初以来,日间气温( $T_a$ )最高已达 27.8℃(4 月 2 日),夜间  $T_a$  最低也高达 8.0~9.2℃(4 月 1—3 日),20

cm处土壤温度( $T_g$ )日变幅在13.7~18.8℃,气温与地温较均高,果树已进入盛花期;但从4月6日15:00开始, $T_a$ 从7.6℃开始连续下降,到夜间23:00降至0.4℃,到次日(4月7日)5:00降至最低(-5.4℃),下降速率为 $0.93\text{℃}\cdot\text{h}^{-1}$ (图1a)。之后逐渐回升,于7:30回升到 $0\text{℃}$ 以上。霜冻发生期间连续低温( $<0\text{℃}$ )持续时间为8.5 h,但霜冻最严重时20 cm处 $T_g$ 仍然在 $7.2\text{℃}$ 以上,地上、地下温差大( $12.6\text{℃}$ )(图1a)。

霜冻发生前,净辐射( $R_n$ )最高已达 $1.96\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ (4月2日12:00)。霜冻期间最低值为 $-0.28\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ (图1b),但日出后 $R_n$ 快速上升,在霜冻发生的当日午间12:00高达 $2.1\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ , $R_n$ 的快速上升促进了植株的蒸腾失水,会加剧霜冻的危害程度。

从4月6日15:00气温下降开始,空气湿度( $RH$ )从18%开始呈上升趋势,到最低温出现的4月7日5:00时 $RH$ 达到60%(图1c)。霜冻形成期间,风速从4月6日15:00的 $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 开始呈下降趋

势,到7日气温最低的5:00风速平均也只有 $0.47\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图1d)。空气扩散条件差,与低温、高湿一起促进花的结冰并加重了霜冻的危害性。

### 3.2 霜冻发生前、后数日内果树液流速率日动态的变化

2018年4月初至霜冻发生前, $J_s$ 的日最大值( $J_{s-\max}$ )为 $(12.89\pm 2.98)\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$ (均值 $\pm$ 标准误差)(4月2日13:00),果树蒸腾水平已经达到较高的水平。在4月7日凌晨发生严重霜冻后的当日, $J_{s-\max}$ 为 $(11.04\pm 3.13)\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$ (15:00),并在4月8日达到本月的最高值( $15.38\pm 4.18)\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$ (13:00)(图2)。采用一日内液流速率最大时的值与此刻大气水分亏缺的比值( $J_{s-\max}/VPD$ )这一标准化指标比较果树自身水分传输能力的变化,比较表明:在霜冻发生前 $J_{s-\max}/VPD$ (3株树平均值)随着果树的生长进程而逐渐上升,并在霜冻前达到最大值;霜冻发生后的数日内, $J_{s-\max}/VPD$ 呈逐渐递减的趋势,表明霜冻的发生在短期内降低了果树液流传输对 $VPD$ 驱动的反应能力。

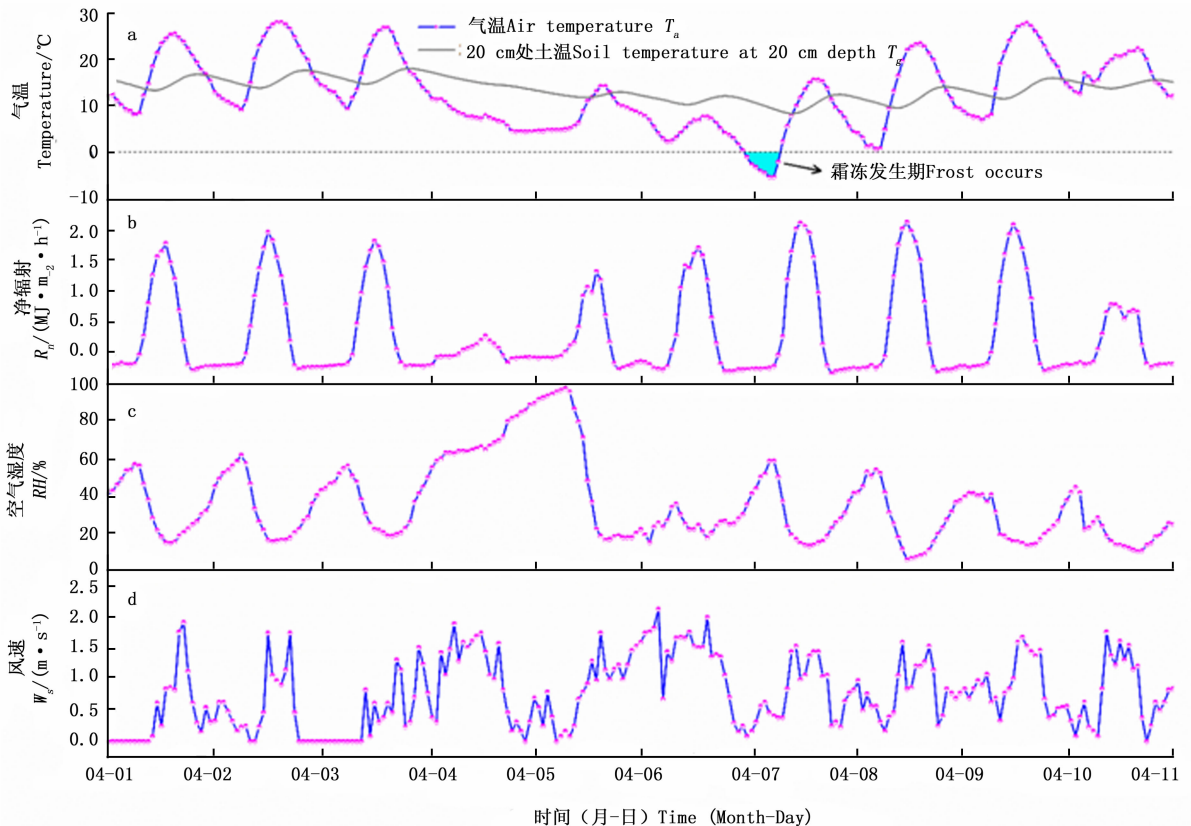
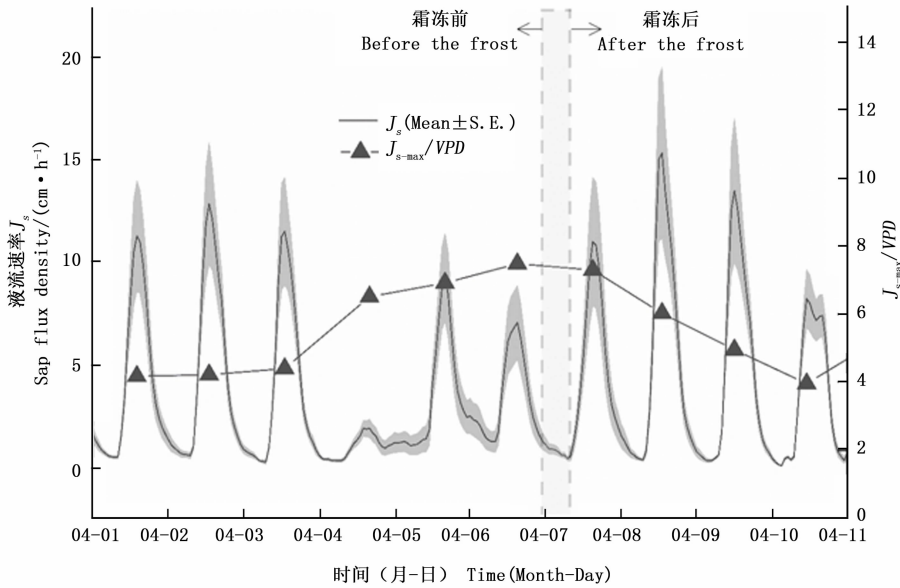


图1 2018年4月特大霜冻发生过程及其前后数日的主要气象条件

Fig. 1 Major meteorological conditions during and after the serious frost in April 2018



注:灰色区域为正负标准误差(S.E.)的范围

Note: The gray area is the range of positive and negative standard errors (S.E.)

图2 霜冻前、后数日内果树液流速率  $J_s$  的日动态及对大气水分亏缺驱动的反应动态

Fig.2 Diurnal dynamics of sap flux density of apple trees before and after frost, as well as the response of sap flux density to vapor pressure deficit

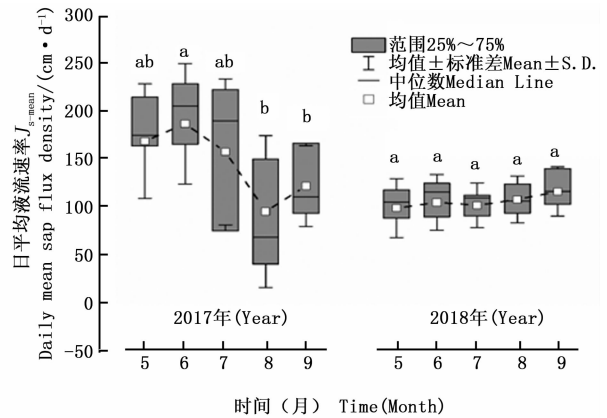
### 3.3 未发生霜冻年、霜冻年生长季果树液流速率及环境因素的比较

对未发生霜冻年(2017)和霜冻年(2018)的主要生长季(5—9月)果树液流传输速率的日平均值( $J_{s-mean}$ )进行方差分析,结果(图3)表明: $J_{s-mean}$ 在2017年(未发生霜冻)平均为  $161.40 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,在2018年(霜冻年)下降为  $104.79 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,2年间差异极显著( $P < 0.01$ );但2018年的环境变量如  $VPD$ 、 $R_n$ 、 $R_a$ 、 $ET_0$ 、 $T_a$  等均值均高于2017年度的均值(除  $ET_0$  差异显著外,其它变量差异不显著)(表2),2018年度主要生长季的降水总量比2017年同期多  $76.6 \text{ mm}$ (表2),表明霜冻年生长季平均液流速率的降低并不是由于气象和环境因子所致。

进一步比较表明:在2017年,6月的  $J_{s-mean}$  最高,为  $186.96 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ;8月的最低,为  $94.89 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。不同月份间差异显著( $P = 0.04$ )(图3)。相比较而言,在霜冻发生后的2018年,  $J_{s-mean}$  在5月最低( $98.47 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ),9月最高( $115.95 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ )。各月间差异不显著( $P = 0.33$ ),但总体上仍表现出随季节的变化而递增的趋势。

### 3.4 未发生霜冻年、霜冻年生长季液流速率与主要气象因子间关系的比较

对未发生霜冻年、霜冻年生长季(5—9月)期间



注:图中相同字母表示均值差异不显著。

Note: The same letter means no significant difference.

图3 霜冻发生前、后不同年份果树主要生长季各月液流速率日平均值( $J_{s-mean}$ )的比较

Fig.3 Comparison of daily mean sap flux density of apple trees in the main growing season before and after the frost

液流速率日平均值( $J_{s-mean}$ )分别与当年主要环境因子  $R_n$ 、 $VPD$  间的关系进行了拟合。结果(图4)表明:不同年份中  $J_{s-mean}$  与  $R_n$  间均表现为指数递增关系,且在相同的  $R_n$  水平时,霜冻年  $J_{s-mean}$  显著低于未发生霜冻年(图4a)。 $J_{s-mean}$  与  $VPD$  日平均值间也表

现为指数递增关系,且在相同的  $VPD$  条件下,霜冻前年  $J_{s\text{-mean}}$  明显低于未发生霜冻年(图 4b)。

表 2 不同年份主要生长季(5—9月)主要环境因子统计

Table 2 Environmental factors in the main growing season (May-September) in 2017 and 2018

月 Month	降雨 Rain/mm		大气水分亏缺 VPD/kPa		净辐射 $R_n$ / ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )		潜在蒸发散 $ET_0$ /( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )		太阳辐射 $R_a$ / ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )		气温 $T_a/^\circ\text{C}$	
	2017	2018	2017	2018	2017	2018	2017	2018	2017	2018	2017	2018
	5	38.40	58.60	1.26	0.91	8.82	8.82	4.52	5.85	18.48	17.29	19.05
6	44.80	32.80	0.94	1.36	9.83	10.32	4.74	6.80	18.74	18.78	21.17	22.43
7	104.00	121.20	0.94	0.65	8.36	10.39	3.37	5.19	14.36	15.75	24.11	24.16
8	63.00	66.00	0.26	0.80	5.16	10.33	2.45	5.33	8.68	16.30	21.28	24.50
9	10.80	59.00	0.23	0.53	3.90	6.62	2.32	3.68	7.77	11.23	16.88	15.85
平均值 Mean	261.0 $\Delta$	337.6 $\Delta$	0.72	0.85	7.21	9.30	3.48	5.37	13.61	15.87	20.50	20.97
P 值 P value	N( $P = 0.48$ )		N( $P = 0.63$ )		N( $P = 0.16$ )		*( $P = 0.02$ )		N( $P = 0.42$ )		N( $P = 0.83$ )	

注:  $\Delta$  为年度求和的值, \* 表示差异显著, N 表示差异不显著, P 值为方差分析中判定显著性的值。

Note:  $\Delta$  is the total value, \* means significant difference, N means insignificant difference, and P means the significance value determined in ANOVA.

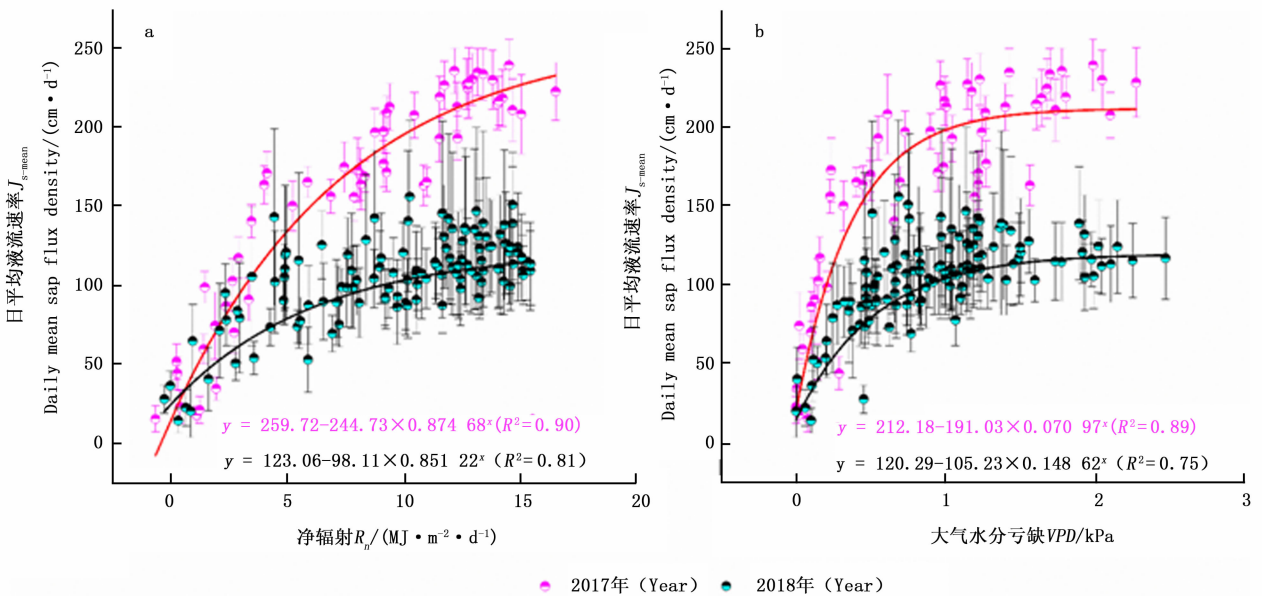


图 4 未发生霜冻年、霜冻年主要生长季日平均液流速率( $J_{s\text{-mean}}$ )与净辐射  $R_n$  (a)、大气水分亏缺  $VPD$  (b) 间的相关关系  
Fig. 4 Relationship between the daily mean sap flux density ( $J_{s\text{-mean}}$ ) and the net solar radiation  $R_n$  (a) as well as the vapor pressure deficit  $VPD$  (b), in the main growing season of the year before and after the frost

## 4 讨论

### 4.1 霜冻对果树水分传输影响的短期和总体效应

2018年4月7日的霜冻,发生在前期气温已较高、20 cm处土壤温度也较高(日最低土壤温度高于7.2 $^\circ\text{C}$ )(图 1a)的早春,基本特征为降温幅度大(33.2 $^\circ\text{C}$ )、气温低(-5.4 $^\circ\text{C}$ )、霜冻持续时间长(8.5 h)、冻后升温快(9 h内气温上升了20.9 $^\circ\text{C}$ )。霜冻前果树液流已完全启动并且日高值达到8.07~18.34 cm · h<sup>-1</sup>的水平,在霜冻发生后的当日,液流

速率跟随气象条件(太阳辐射、气温等)快速上升,当日午间液流速率最高值是霜冻前(4月份)的73%~91%(图 2),在次日(4月8日)高达105%~125%(图 2)。短期内的失水反而带来更大的伤害,在霜冻后数日内  $J_{s\text{-max}}/VPD$  连续下降,表明霜冻对幼叶(气孔)蒸腾带来了一定伤害,这与霜冻会伤害叶片并影响幼叶的生长发育从而影响其蒸腾、光合能力的结论一致<sup>[22]</sup>。

果树的蒸腾与微气象因素有紧密的关系<sup>[23]</sup>。本研究中,虽然霜冻年份生长季环境因素的平均值

普遍高于未发生霜冻年份,并且发生霜冻的年份其降水量比未发生霜冻年份多(表 2),但霜冻发生后果树生长季的平均液流速率比未发生霜冻年份同期降低了 35% (图 3),这表明晚霜冻害(而不是环境因素)造成了果树整体蒸腾能力的下降。有研究表明,严重的冻害会使形成层组织的导水性降低,叶片萎缩并慢慢干枯<sup>[22]</sup>。太阳辐射与大气水分亏缺对叶片气孔行为具有主导作用<sup>[24-26]</sup>。本研究结果也表明,苹果树液流速率与净辐射、大气水分亏缺间具有较好的指数递增关系(图 4);但对于相同的  $R_n$  或  $VPD$  值,霜冻年份的日平均液流速率(拟合曲线)均低于未发生霜冻年,进一步说明霜冻对果树的影响(如叶面积增长量的降低)可能是引起果树整体蒸腾能力下降的主要原因。

#### 4.2 霜冻对果树水分传输影响的可能机制

研究表明,果树遭受冻害的机制主要是结冰伤害、引起蛋白质损伤和原生质膜的伤害<sup>[10]</sup>。霜冻后细胞间结冰形成冰晶并不断扩大,对细胞产生机械压力,迫使细胞原生质脱水并失去活性。胞间结冰对果树的伤害比胞内结冰更大,主要原因是胞间结冰导致原生质过度脱水,造成蛋白质变性或原生质发生不可逆的凝胶化<sup>[10,27]</sup>。另一方面,植物的许多生理功能都在细胞生物膜上进行,低温伤害后细胞质膜首先发生物相变化,膜脂在数小时内就能从液相变为凝胶相而失去半透性<sup>[28]</sup>,致使细胞内电解质外渗。电解质外渗越多,伤害就越严重<sup>[29]</sup>。本次霜冻不论降温幅度之大、持续时间之长(图 1)、伤害程度之严重<sup>[9]</sup>,都可能对果树叶细胞原生质性质及细胞质膜半透性带来严重伤害,这可能是其生长季蒸腾能力整体下降的生理机制。

#### 4.3 快速解冻加剧对果树的伤害

研究认为,冰冻之后的快速解冻比结冰过程对植物的伤害更大<sup>[2]</sup>。霜冻后如果气象条件好、气温快速回升会带来结冰体的快速解冻,细胞间的冰融化成水并迅速蒸发而脱水,直接引起细胞死亡。本次霜冻后 5 h 内净辐射从  $-0.28 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  快速上升到  $2.1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  (图 1b),气温在 9 h 内从  $-5.4^\circ\text{C}$  快速上升到  $15.5^\circ\text{C}$  (图 1a),升幅达  $20.9^\circ\text{C}$ ,如此快速升温会导致胞间冰晶体的快速融化失水,对花、叶等器官带来严重的二次伤害。所以,霜冻当日、次日快速升高的液流速率(图 2)导致果树体内细胞组织的大量失水,从而降低了之后的水分利用能力。

## 5 结 论

霜冻不仅对果树的开花结实带来严重破坏,而且在霜冻解除后的短期内(4~5 d),果树树干边材传输水分的能力( $J_{s,\text{max}}/VPD$ )逐渐下降。与未发生霜冻年同期相比,尽管霜冻年主要气象因子的平均值、降水总量普遍高于未发生霜冻年,但霜冻发生年主要生长季苹果树液流速率的日平均值下降了 35%。苹果树日平均液流速率与净辐射、大气水分亏缺间具有紧密的指数关系,但在相同的净辐射或大气水分亏缺水平下,霜冻年的液流速率显著低于未发生霜冻年。严重低温霜冻和霜冻后快速升温共同导致了苹果树生长季水分利用能力的显著下降。

#### 参考文献:

- [1] 黄敏,陈杰忠. 果树抗寒性研究进展[J]. 亚热带植物科学, 2011,40(1): 80-84.
- [2] 杨建民,周怀军,王文凤. 果树霜冻害研究进展[J]. 河北农业大学学报,2000,23(3): 54-58.
- [3] 王有明. 苹果早春开花期霜冻寒潮冻害危害调查及预防对策[J]. 农业科技与信息,2018(14): 78-82.
- [4] 孙智辉,马远飞,高志斌,等. 洛川苹果花期冻害气候特征及人工防霜可行性探讨[J]. 农学学报,2015,5(11): 109-112.
- [5] 王景红,高峰,刘璐,等. 陕西省富士系苹果花晚霜冻指标研究[J]. 干旱地区农业研究,2015,33(4): 268-272.
- [6] 宋素智,柴全喜,张大彪. 2018 年果树花期冻害调查[J]. 北方果树,2018(4): 51-53.
- [7] 汪景彦. 西北黄土高原等果区晚霜冻危害及灾后恢复措施[J]. 中国果树,2018(4): 1-3.
- [8] 王亚荣,田鑫,王骞. 运城盐湖区梨树早春霜冻调研及预防措施[J]. 山西果树,2018(5): 35-36.
- [9] 路超,蔡华成,张国强,等. 山西省苹果花期冻害调查及灾后对策[J]. 落叶果树,2018,50(3): 15-17.
- [10] 李支成. 果树生理生化状况与抗寒性的关系研究进展[J]. 安徽农学通报,2012,18(11): 90-91.
- [11] Børja I, Světlik J, Nadezhdin V, et al. Sap flux—a real time assessment of health status in Norway spruce[J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2016,31(5): 450-457.
- [12] Nadezhdina N, Cermák J, Downey A, et al. Sap flow index as an indicator of water storage use[J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2015,63(2): 124-133.
- [13] Aroca R. Plant responses to drought stress: from morphological to molecular features[M]. Berlin: Springer,2012.
- [14] Ryan M G. Tree responses to drought[J]. Tree Physiology,2011, 31(3): 237-239.
- [15] 马长明,翟明普. 干季核桃树干液流特征及其与气象因子的关系[J]. 林业科学研究,2007,20(6): 883-886.
- [16] 蔡智才,毕华兴,许华森,等. 晋西黄土区苹果花生间作系统光合有效辐射及其对花生生长的影响[J]. 西北农林科技大学学

- 报:自然科学版,2017,45(4): 51-58.
- [17] Campbell G S, Norman J M. An introduction to environmental biophysics[M]. New York: Springer, 1998.
- [18] Dang H Z, Zha T S, Zhang J S, et al. Radial profile of sap flow velocity in mature Xinjiang poplar (*Populus alba* L. var. *pyramidalis*) in Northwest China[J]. Journal of Arid Land, 2014, 6(5): 612-627.
- [19] 党宏忠,李卫,李永华,等. 新疆杨树杆液流密度轴向差异的初步研究[J]. 林业科学研究, 2012, 25(6): 739-744.
- [20] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements[J]. Tree Physiology, 1987, 3(4): 309-320.
- [21] Lu P, Urban L, Zhao P. Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice[J]. Acta Botanica Sinica, 2004, 46(6): 631-646.
- [22] 温吉华,张丽,高坤金. 果树晚霜冻害的特点及预防措施[J]. 果树实用技术与信息, 2018(10): 35-36.
- [23] 张劲松,孟平,尹昌君,等. 果粮复合系统中单株苹果蒸腾需水量的计算[J]. 林业科学研究, 2001, 14(4): 383-387.
- [24] Morgan H D, Barton C. Forest-scale sap flux responses to rainfall in a dryland *Eucalyptus* plantation[J]. Plant and Soil, 2008, 305(1(2)): 131-144.
- [25] 池波,蔡体久,满秀玲,等. 大兴安岭北部兴安落叶松树干液流规律及影响因子分析[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(4): 21-26.
- [26] 孙慧珍,孙龙,王传宽,等. 东北东部山区主要树种树干液流研究[J]. 林业科学, 2005, 41(3): 36-42.
- [27] 乌凤章,王贺新,徐国辉,等. 木本植物低温胁迫生理及分子机制研究进展[J]. 林业科学, 2015, 51(7): 116-128.
- [28] 姜云天,曲柏宏,陈艳秋. 果树冻害机理及防寒农业措施研究进展[J]. 吉林师范大学学报:自然科学版, 2006, 27(1): 38-40.
- [29] 曲柏宏,朴红权,代志国,等. 利用电导法测定苹果新品种的抗寒性[J]. 北方果树, 1998(1): 5-6.

## Effects of Late Frost Damage on Water Use of Apple Trees in Loess Plateau Area

DANG Hong-zhong<sup>1</sup>, FENG Jin-chao<sup>1</sup>, DONG Rui-xiang<sup>2</sup>, QUE Xiao-e<sup>1</sup>, WANG Meng-meng<sup>3</sup>, ZHANG Jin-xin<sup>4</sup>

(1. Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Bureau of Forestry and Grassland of Anding District, Gansu province, Dingxi 743000, Gansu, China; 3. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China; 4. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

**Abstract:** [Objective] To determine the degree and mechanism of frost damage on water use in growing season of apple trees. [Method] Thermal dissipation probe (TDP) was used to monitor continuously the sap flux density ( $J_s$ ) of apple trees before and after the frost during the main growing seasons for two years. The micro-meteorological factors such as net radiation ( $R_n$ ), air temperature ( $T_a$ ) were measured synchronously and the derived variables such as vapour pressure deficit (VPD) was calculated. The effects of late frost on water use of apple trees were analyzed. [Result] The maximum sap flux density ( $J_{s-max}$ ) around noon on the frost-occurred day decreased by 9% - 27% compared with the days before the frost occurring, and  $J_{s-max}/VPD$  decreased continuously in the days after the frost occurring. By comparison, the average daily sap flux density ( $J_{s-mean}$ ) in growing season of the frost year (2018) was 35% lower than that in the non-frost year (2017). In the whole main growth season,  $J_{s-mean}$  showed a significant exponential relationship with  $R_n$  or VPD, but the  $J_{s-mean}$  of frost-year was significantly lower than that of non-frost-year at the same level of  $R_n$  (or VPD). [Conclusion] The severe low temperature frost with rapid rise of air temperature after frost together, will cause a significant decline in water use potential of apple trees during the growing season. The results provide support for understanding the mechanism of frost's influence on water physiology of apple trees.

**Keywords:** frost; sap flux density; vapor pressure deficit; solar net radiation; apple trees; the Loess Plateau

(责任编辑:徐玉秀)