

文章编号: 2096-4749(2018)01-0050-06

DOI:10.13320/j.cnki.hjfor.2018.0008

引文格式: 孟昱, 路斌, 张钢. 涝渍胁迫下白桦叶和茎中可溶性糖和淀粉含量相关性研究[J]. 林业与生态科学, 2018, 33(1): 50-55.

MENG Yu, LU Bin, ZHANG Gang. Correlation of contents of soluble sugar and starch in leaves and stems of white birch under waterlogging and flooding stresses[J]. Forestry and Ecological Sciences, 2018, 33(1): 50-55.

## 涝渍胁迫下白桦叶和茎中可溶性糖和 淀粉含量相关性研究

孟昱<sup>1</sup>, 路斌<sup>1</sup>, 张钢<sup>2</sup>

(1 河北农业大学 园林与旅游学院, 河北 保定 071001; 2 河北农业大学 园艺学院, 河北 保定 071001)

**摘要:** 为了解涝渍胁迫下白桦体内可溶性糖和淀粉含量的变化, 以 2 a 生白桦实生苗为材料, 研究了涝渍胁迫对白桦叶片和茎中可溶性糖和淀粉含量的影响及其之间的相关性。结果表明: 在渍水处理条件下, 叶片中可溶性糖和淀粉含量呈上升趋势, 处理到第 60 天, 可溶性糖和淀粉含量显著高于对照, 分别比对照升高了 27.1% 和 41.6%; 在淹水处理条件下, 叶片中可溶性糖和淀粉含量呈先升高后下降趋势, 处理到第 60 天, 淀粉含量显著高于对照, 比对照升高了 34.1%, 而可溶性糖含量与对照差异不显著。在渍水处理条件下, 茎中可溶性糖含量呈升高趋势, 而淀粉含量呈先下降后升高趋势, 处理到第 60 天, 可溶性糖和淀粉含量都与对照差异不显著; 在淹水处理条件下, 茎中可溶性糖和淀粉含量都呈先上升后下降趋势, 处理到第 60 天, 可溶性糖含量显著低于对照, 比对照降低了 19.5%, 而淀粉含量与对照差异不显著。在涝渍胁迫下, 叶和茎中可溶性糖含量与淀粉含量均呈显著的正相关, 其相关系数分别为 0.790 和 0.623, 并且叶片可溶性糖含量与茎中可溶性糖含量也呈显著的正相关, 相关系数为 0.674。以上结果表明, 糖和淀粉的存储和消耗对提高白桦耐涝能力有着积极的生理作用。

**关键词:** 白桦; 涝渍; 胁迫; 可溶性糖; 淀粉

**中图分类号:** S792.153, Q946.3

**文献标志码:** A

### Correlation of contents of soluble sugar and starch in leaves and stems of white birch under waterlogging and flooding stresses

MENG Yu<sup>1</sup>, LU Bin<sup>1</sup>, ZHANG Gang<sup>2</sup>

(1 College of Landscape and Travel, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China;

2 College of Horticulture, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China)

**Abstract:** To investigate changes of soluble sugar and starch contents in white birch (*Betula platyphylla* Suk.) under waterlogging and flooding stresses, the effect and correlation of soluble sugar and starch contents in leaves and stems of two-year-old white birch seedlings under waterlogging and flooding stresses were studied. The results indicated that: Under

收稿日期: 2017-09-11; 修回日期: 2017-10-30

基金项目: 河北省教育厅青年基金(QN2015170)。

第一作者: 孟昱(1984-), 男, 河北石家庄人, 博士, 讲师, 研究方向: 观赏植物抗性生理研究。

通讯作者: 张钢(1959-), 男, 河北栾城人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事观赏植物抗性生理研究。

waterlogging treatment, the contents of soluble sugar and starch in leaves rose, and on day 60 after treatment, the contents of soluble sugar and starch in waterlogging treatment were significantly higher than that in control with increase of 27.1% and 41.6%, respectively. Under flooding treatment, the contents of soluble sugar and starch in leaves changed with a trend of rising first and then falling. On day 60 after treatment, the content of starch in flooding treatment was 34.1% significantly higher than that in control. However, the content of soluble sugar did not differ significantly between flooding treatment and control. The content of starch in stems decreased first and then increased, while the content of soluble sugar was rising under waterlogging treatment. On day 60 after treatment, the contents of soluble sugar and starch were not significantly different between waterlogging treatment and control. The contents of soluble sugar and starch in stems were changed with a trend of rising first and then falling under flooding treatment. On day 60 after treatment, the content of soluble sugar in flooding treatment was 19.5% lower than that in control. However, the content of starch did not differ significantly between flooding treatment and control. The content of soluble sugar was significantly and positively correlated with the contents of starch in leaves and stems under waterlogging and flooding stresses, and the correlation coefficients were 0.790 and 0.623, respectively. And there was a significantly positive correlation between the contents of soluble sugar in leaves and stems, and the correlation coefficient was 0.674. It showed that storage and consumption of soluble sugar and starch had active effects on flood-resistance of white birch.

**Key words:** white birch; waterlogging and flooding; stress; soluble sugar; starch

近年来,由于全球气候变暖导致部分地区突发性暴雨增加,使洪水和土壤水位上升发生的频率增多<sup>[1]</sup>,从而使土壤处于涝渍状态。土壤涝渍会对植物的形态和代谢产生显著的影响,导致植物生长受到限制<sup>[2-5]</sup>。植物通过改变自身形态和生理生化变化适应涝渍胁迫下生长<sup>[6-7]</sup>。可溶性糖和淀粉是植物体的光合产物<sup>[8-9]</sup>,也可作为植物在逆境中的渗透调节物质,通过渗透调节物质可以改变细胞内的渗透压,从而降低逆境对植物细胞的伤害。前人研究表明,植物体内的可溶性糖和淀粉受土壤涝渍胁迫的影响会发生变化<sup>[10-11]</sup>。目前,有关涝渍胁迫对植物可溶性糖和淀粉的影响主要集中在玉米、小麦、棉花等农作物上<sup>[12-14]</sup>,在林木方面的研究报道很少。为此,以白桦(*Betula platyphylla* Suk.) 2 a 生实生苗为材料,通过人工模拟涝渍胁迫,揭示涝渍胁迫对白桦叶和茎可溶性糖与淀粉含量的影响规律,旨在为指导白桦生产和丰富林木耐涝机理提供借鉴。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

试验材料为生长一致的白桦 2 a 生实生苗。采

用盆栽试验方法,培养基质为园田土和蛭石混合配制(园田土和蛭石的比例为 2:1)。5 月 15 日将苗木栽植于塑料盆中(上径、下径、高:26 cm、18.5 cm、20 cm),每盆 3 株,并置于人工气候室内(白天温度/夜间温度设置:25 °C/15 °C;白天时长/夜间时长:15 h/9 h;空气相对湿度为 70%~75%;光照强度为 3 000 lx)进行培养,苗木恢复生长后进行涝渍处理。

### 1.2 试验方法

涝渍处理于 7 月 2 日开始进行,以土壤含水量为田间持水量的 75%为对照;渍水处理是盆内水面与土面相平行;淹水处理是盆内有积水,水面高于土面 2 cm 左右。每天下午 5:00 利用土壤水分速测仪和观测法测定盆中土壤容积含水量,根据缺水量补水,维持在所设定的处理条件。每个处理 20 盆。在处理的第 6 天、第 18 天、第 36 天和第 60 天分别取样测定茎和叶中的可溶性糖和淀粉含量。

### 1.3 测定方法

每个处理中随机选取 3 株苗木,将苗木的地上部分(茎和叶)剪取下来带回实验室,然后用去离子水洗净,再用吸水纸将苗木上的水分擦干,分别切取茎中部 15 mm 茎段和叶片各 0.5 g 放入干燥皿

中,然后置于烘箱中,温度设置在 105 ℃,杀青 20 min,随后降低温度,使之保持在 80 ℃,烘干 48 h 至恒重取出,待用。

可溶性糖含量测定:按照董胜豪的方法进行<sup>[15]</sup>,取 2 mL 溶解液,并加入 0.2% 蒽酮试剂 5 mL 进行混合显色测定光密度,从标准曲线查出可溶性糖的量,然后计算可溶性糖含量。

淀粉含量测定:按照董胜豪的方法进行<sup>[15]</sup>,吸取 2 mL 提取液,加入试管内,再加入 0.2% 蒽酮试剂 5 mL 使其混合显色测定光密度,从标准曲线查出淀粉的量,计算淀粉含量。计算公式(1)和(2)如下:

$$S = (C \times (V/A) \times n) \times 100 / (W \times 1000) \quad (1)$$

$$D = (C \times (V/A) \times n \times 0.9) \times 100 / (W \times 1000) \quad (2)$$

式中,C 为从标准曲线上查得样品测定管中含

葡萄糖的微克数;V 为样品提取液总容积(mL);A 为显色时取用样液量(mL);n 为稀释倍数;W 为样品干重(mg);S 为可溶性糖含量(%);D 为淀粉含量(%);0.9 为葡萄糖换算为淀粉的系数。

#### 1.4 统计分析

用 SPSS 13.0 软件计算可溶性糖和淀粉含量均值、标准误差及其之间的相关性。用 SPSS 13.0 进行单因素方差分析,不同处理之间多重比较采用 Tukey 和 Duncan 方法。

## 2 结果与分析

### 2.1 涝渍胁迫对白桦叶片中可溶性糖和淀粉含量的影响

涝渍胁迫对白桦叶片可溶性糖和淀粉含量的影响见图 1。

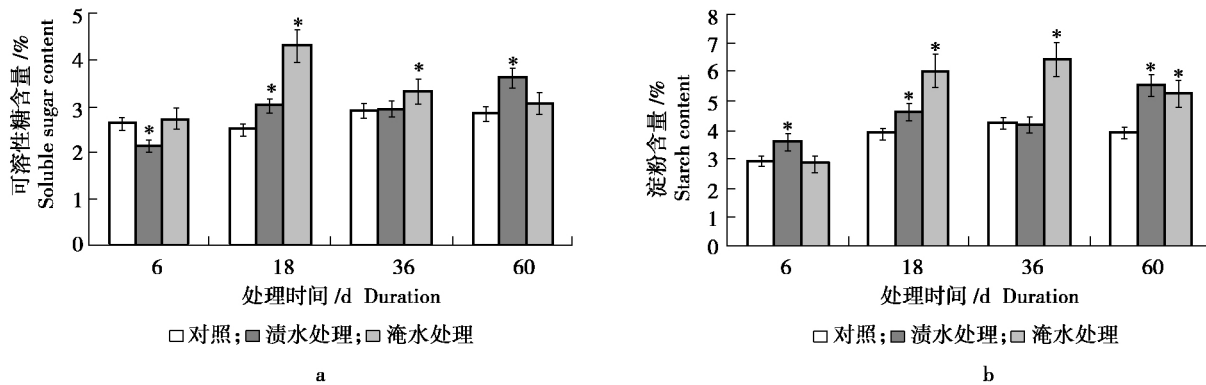


图 1 涝渍胁迫下白桦叶中可溶性糖(a)和淀粉(b)含量的变化

Figure 1 Changes in soluble sugar (a) and starch (b) contents in

*Betula platyphylla* Suk. leaves under waterlogging and flooding stresses

\*表示在同一时期渍水处理和淹水处理分别与对照相比较,差异达到显著水平( $n=3, P<0.05$ ),下同。

由图 1a 可知,随着涝渍胁迫时间的增加,渍水处理可溶性糖含量整体呈升高趋势,而淹水处理呈先升高后降低的趋势。处理到第 6 天时,渍水处理可溶性糖含量显著低于对照,比对照降低了 17.7% ( $P<0.05$ );到第 18 天时,渍水处理和淹水处理的可溶性糖含量显著高于对照,分别比对照升高了 20.0% 和 71.9%;到第 36 天时,淹水处理可溶性糖含量显著高于对照,比对照升高了 14.3%;到第 60 天时,渍水处理可溶性糖含量显著高于对照,比对照升高了 27.1%。

由图 1b 可知,随着涝渍胁迫的增加,渍水处理和淹水处理的淀粉含量变化与可溶性糖含量变化趋势基本相同。渍水处理淀粉含量呈整体升高趋势,而淹水处理淀粉含量呈先升高后降低的趋势。处理到第 6 天时,渍水处理的淀粉含量显著高于对

照,比对照上升了 22.2%;到第 18 天时,渍水处理和淹水处理的淀粉含量显著高于对照,分别比对照升高了 19.3% 和 56.1%;到第 36 天时,淹水处理的淀粉含量显著高于对照,比对照上升了 51.2%;到第 60 天时,渍水处理和淹水处理的淀粉含量显著高于对照,分别比对照升高了 41.6% 和 34.1%。

### 2.2 涝渍胁迫对白桦茎中可溶性糖和淀粉含量的影响

涝渍胁迫下白桦茎中可溶性糖和淀粉含量的变化见图 2。

由图 2a 可知,茎中可溶性糖含量在涝渍胁迫下的变化与叶中可溶性糖含量变化趋势相一致。渍水处理整体呈升高趋势;淹水处理呈先升高后降低趋势。当处理到第 6 天时,渍水处理可溶性糖含量显著高于对照,比对照升高了 40.4%,而淹水处理

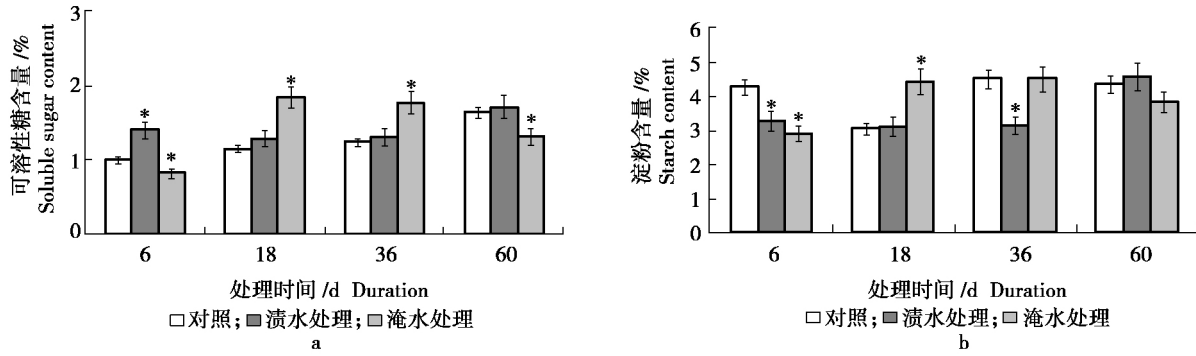


图 2 涝渍胁迫下白桦茎中可溶性糖(a)和淀粉(b)含量的变化

Figure 2 Changes in soluble sugar (a) and starch (b) contents in

*Betula platyphylla* Suk. stems under waterlogging and flooding stresses

的可溶性糖含量显著低于对照,比对照降低了 18.0%;第 18 天和第 36 天时,淹水处理显著高于对照,比对照分别升高了 61.4%和 43.2%;到第 60 天时,淹水处理显著低于对照,比对照降低了 19.5%。

由图 2b 可知,渍水处理的淀粉含量随着胁迫处理时间的延长呈先降低后升高的趋势;而淹水处理呈先升高后降低的趋势,这与渍水处理变化趋势相反。当处理到第 6 天时,渍水处理和淹水处理淀粉含量显著低于对照,比对照分别降低了 22.8%和

31.3%;到第 18 天时,淹水处理淀粉含量显著高于对照,比对照升高了 50.0%;到第 36 天时,渍水处理淀粉含量显著低于对照,比对照降低了 30.5%;到第 60 天时,渍水处理和淹水处理与对照差异都不显著。

### 2.3 涝渍胁迫下白桦叶和茎中可溶性糖和淀粉含量之间的相关性

涝渍胁迫下白桦叶和茎中可溶性糖和淀粉含量之间的相关性如图 3—图 5 所示。

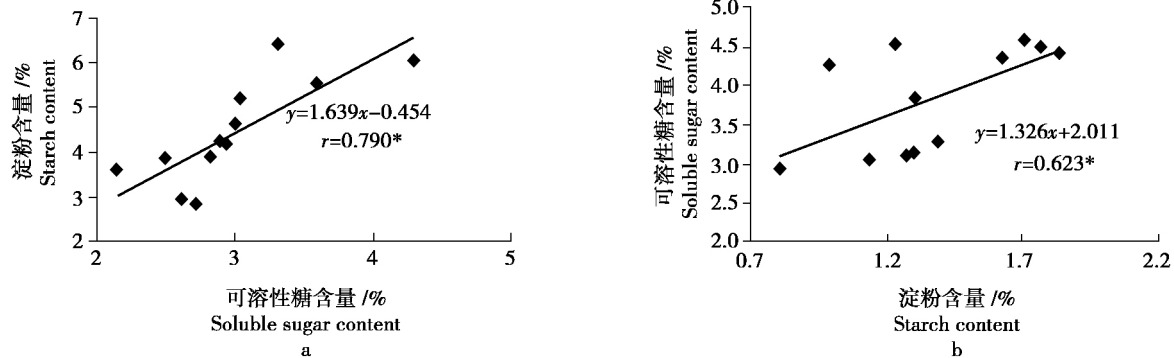


图 3 涝渍胁迫下白桦叶(a)和茎(b)中可溶性糖和淀粉含量之间相关性

Figure 3 The correlation of contents of soluble sugar and starch in

*Betula platyphylla* Suk. leaves (a) and stems (b) under waterlogging and flooding stresses

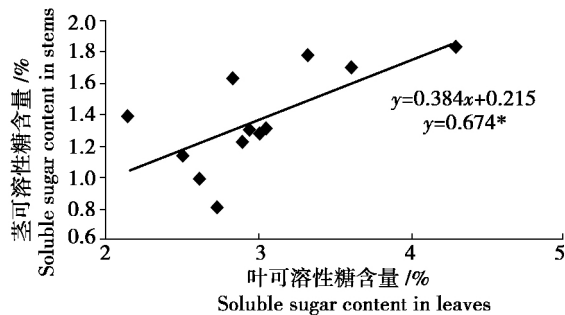


图 4 涝渍胁迫下白桦叶和茎中可溶性糖含量的相关性

Figure 4 The correlation of content of soluble sugar in

*Betula platyphylla* Suk. leaves and stems under waterlogging and flooding stresses

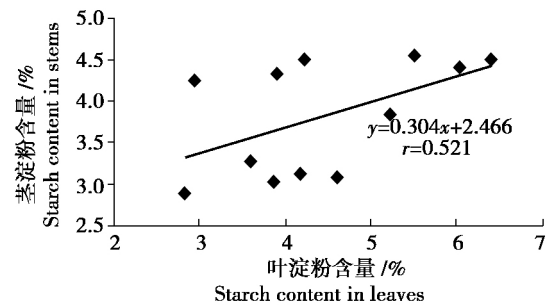


图 5 涝渍胁迫下白桦叶和茎中淀粉含量之间相关性

Figure 5 The correlation of content of starch in

*Betula platyphylla* Suk. leaves and stems under waterlogging and flooding stresses

涝渍胁迫下白桦叶和茎中可溶性糖含量与淀粉含量呈显著的正相关,相关系数分别为 0.790 和 0.623(图 3a,图 3b);白桦叶片中可溶性糖含量与茎中可溶性糖含量也呈显著的正相关,相关性系数为 0.674(图 4);白桦叶片中淀粉含量与茎中淀粉含量相关性不显著(图 5)。

### 3 结论与讨论

植物组织中可溶性糖含量的变化在一定程度上可以表征植物受到的胁迫程度<sup>[16-17]</sup>。本研究结果表明,在渍水胁迫初期,白桦地上部胁迫主要作用于茎,而胁迫中期,主要作用于叶。这与陈龙等人对小麦的研究结果不同<sup>[13]</sup>。这可能是由于不同植物生物特性差异造成的。

本试验中,叶中可溶性糖含量与茎中可溶性糖含量变化存在密切的关系,其相关系数达到 0.674。赵江涛等人认为,在高等植物中可溶性糖是重要的碳水化合物,并且叶片制造的碳水化合物暂时储存于茎和叶鞘中,茎部可作为碳水化合物的临时“库”,并且它也是渗透调节物质之一<sup>[18-19]</sup>。因此,可以说明在渍水胁迫初期,叶片仍可以把制造的可溶性糖运输到茎中,提高茎中可溶性糖含量,从而维持茎的细胞渗透势,避免茎中细胞受到损害。而胁迫到中后期,由于叶片受到伤害,部分可溶性糖用于叶片中细胞渗透调节,从而降低了可溶性糖运输到茎中的含量。

本试验研究结果表明,白桦体内的可溶性糖含量随着淹水胁迫时间的增加,呈先升高后降低的趋势。这与前人研究结果相同<sup>[20-21]</sup>。本试验中,淹水胁迫初期和淹水胁迫后期会降低茎中可溶性糖含量,而在胁迫中期,会使叶片与茎中可溶性糖含量提高,原因可能是短期淹水胁迫会暂时抑制叶中可溶性糖运输到茎中,而长期淹水胁迫会引起植物体内新陈代谢紊乱,影响渗透调节机制以及糖代谢,从而导致可溶糖含量降低。而在淹水胁迫中期,叶片和茎同时会受到胁迫,通过提高可溶性糖含量进行细胞内的渗透调节,从而避免细胞受到损伤。

淀粉是植物体中重要的长期贮存物质之一<sup>[22]</sup>。本研究结果表明,白桦叶和茎中淀粉含量随着渍水胁迫时间的增加而增加,而淹水胁迫处理条件下,叶片和茎中淀粉含量呈先增加后减小趋势。这与前人研究的相关结果一致<sup>[23-24]</sup>,但是与孟昱等人研究的涝渍对白桦根系中淀粉含量变化结果不一

致<sup>[25]</sup>。这可能是由于植物不同器官特性存在差异造成的。本试验研究结果表明,涝渍胁迫后期会提高白桦叶片内淀粉含量的积累。而淀粉含量的积累可能与涝渍胁迫导致的光合产物运输受阻有关。淀粉是植物的主要光合产物,是在叶绿体内合成的<sup>[26]</sup>。史兰波和李云荫研究指出,叶绿体是对水分胁迫比较敏感的细胞器<sup>[27]</sup>。在非逆境胁迫下,植物叶片白天通过光合作用所积累的淀粉,在夜间被水解并运出叶绿体<sup>[26]</sup>。长时间涝渍胁迫会导致白桦体内呼吸代谢紊乱,产生的 ATP 减少,从而抑制了水解淀粉的能力,光合产物运输受阻,导致叶片中淀粉含量升高。本试验研究结果表明,涝渍胁迫下白桦体内淀粉积累与体内可溶性糖的合成、转运和积累有密切关系,叶和茎中二者相关系数分别达到 0.790 和 0.623。淀粉在逆境下会主动转化为糖类物质,以维持呼吸消耗、加强抵抗逆境的能力<sup>[11]</sup>。因此,可溶性糖和淀粉的存储和消耗对提高白桦抗涝能力有着积极的生理作用。

#### 参考文献:

- [1] 谈广鸣,胡铁松. 变化环境下的涝渍灾害研究进展[J]. 武汉大学学报:工学版, 2009, 42(5): 565-571.
- [2] 尹冬梅,陈发棣,陈素梅. 涝渍胁迫下 5 种菊花近缘种属植物生理特性[J]. 生态学报, 2009, 29(4): 22143-2148.
- [3] Thomas A L, Guerreiro S M C, Sodek L. Aerenchyma formation and recovery from hypoxia of the flooded root system of nodulated soybean [J]. *Annals of Botany*, 2005, 96 (7): 1191-1198.
- [4] Ye Y, Tam N F Y, Wong Y S, *et al.* Growth and physiological responses of two mangrove species (*Bruguiera gymnorrhiza* and *Kandelia candel*) to waterlogging[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2003, 49(3): 209-221.
- [5] 季艳林,赖慧灵,郑茹萍,等. 植物涝渍胁迫应激机制研究进展[J]. 生物技术进展, 2016, 6(1): 1-5.
- [6] 张阳,李瑞莲,张德胜,等. 涝渍对植物影响研究进展[J]. 作物研究, 2011, 25(2): 420-424.
- [7] 晏军,吴启侠,朱建强,等. 拔节期杂交中稻对淹水胁迫的响应及指示性指标探讨[J]. 中国稻米, 2017, 23(1): 17-25.
- [8] 何涛,吴学明,张改娜,等. 几种高山植物叶绿体淀粉粒的变化特征[J]. 武汉植物学研究, 2005, 23(6): 545-548.
- [9] 付晓玲,倪红伟,王建波. 氮沉降对三江平原湿地小叶章构件结构和光合产物的影响[J]. 国土与自然资源研究, 2017(3): 87-92.
- [10] 江敏,刘才,宁慧宇,等. 脱落酸对涝渍条件下棉花幼苗生长及相关生理指标的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(7): 73-75.
- [11] 刘永林,唐性波,李两正. 水涝胁迫对银杏叶片细胞溶质和淀粉含量的影响[J]. 湖北农机化, 2009 (5): 60-61.

- [12] 任佰朝, 张吉旺, 李霞, 等. 淹水胁迫对夏玉米籽粒灌浆特性和品质的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(21): 4435-4445.
- [13] 陈龙, 李季平, 杨光宇, 等. 灌浆期涝渍胁迫对小麦生理生化特性的影响[J]. 河南农业科学, 2002(6): 8-9.
- [14] 刘凯文, 苏荣瑞, 朱建强, 等. 棉花苗期叶片关键生理指标对涝渍胁迫的响应[J]. 中国农业气象, 2012, 33(3): 442-447.
- [15] 董胜豪, 张钢, 卻书鹏, 等. 抗寒锻炼期间白皮松电阻抗图谱参数对可溶性糖与淀粉含量变化的响应[J]. 河北农业大学学报, 2009, 32(3): 53-58.
- [16] 国春晖, 沙伟, 李孝凯. 干旱胁迫对三种藓类植物生理特性的影响[J]. 北方园艺, 2014(9): 78-82.
- [17] 赵超, 王海燕, 刘美珍, 等. 干旱胁迫下木薯茎秆可溶性糖、淀粉及相关酶的代谢规律[J]. 植物生理学报, 2017(5): 795-806.
- [18] 赵江涛, 李晓峰, 李航, 等. 可溶性糖在高等植物代谢调节中的生理作用[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(24): 6423-6425 + 6427.
- [19] 祝丽香, 王建华, 孙印石, 等. 桔梗开花后可溶性糖和淀粉分配特性的研究[J]. 园艺学报, 2010, 37(2): 319-324.
- [20] 郑佳秋, 顾闽峰, 郭军, 等. 涝渍胁迫下辣椒的生理特性[J]. 江苏农业学报, 2012, 28(3): 617-621.
- [21] 支丽燕, 胡松竹, 余林, 等. 涝渍胁迫对圆齿野鸭椿苗期生长及其叶片生理的影响[J]. 江西农业大学学报, 2008, 30(4): 279-282.
- [22] 潘庆民, 韩兴国. 植物非结构性贮藏碳水化合物的生理生态学进展[J]. 植物学报, 2002, 19(1): 30-38.
- [23] Malik A I, Colmer T D, Lambers H, *et al.* Short-term waterlogging has long-term effects on the growth and physiology of wheat[J]. *New Phytologist*, 2002, 153(2): 225-236.
- [24] 汪天, 王素平, 郭世荣, 等. 低氧胁迫下黄瓜幼苗根系多胺代谢的变化[J]. 园艺学报, 2005, 32(3): 433-437.
- [25] 孟昱, 邸葆, 张钢, 等. 涝渍胁迫下白桦根系可溶性糖和淀粉含量与电阻抗的相关性分析[J]. 生物物理学报, 2013, 29(6): 450-460.
- [26] 何涛, 吴学明, 张改娜, 等. 几种高山植物叶绿体淀粉粒的变化特征[J]. 武汉植物学研究, 2005, 23(6): 545-548.
- [27] 史兰波, 李云荫. 水分胁迫对冬小麦幼苗几种生理指标和叶绿体超微结构的影响(简报)[J]. 植物生理学通讯, 1990(2): 28-31.

(编辑 潘秀华)

(上接第 43 页)

- [3] 吴祥定. 树木年轮与气候变化[M]. 北京: 气象出版社, 1990: 171-172.
- [4] 张同文, 袁玉江, 魏文寿, 等. 内蒙古东北部莫尔道嘎地区树轮年表的建立[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(12): 177-182.
- [5] 康兴成. 青海都兰地区 1835a 年轮序列的建立和初步分析[J]. 科学通报, 1997, 42(10): 1089-1091.
- [6] 刘禹, 马利民. 树轮宽度对近 376 年呼和浩特季节降水的重建[J]. 科学通报, 1999, 44(18): 1986-1992.
- [7] 邵雪梅, 吴祥定. 利用树轮资料重建长白山地区过去气候变化[J]. 第四纪研究, 1997(1): 76-85.
- [8] 汪青春, 周陆生, 秦宁生, 等. 利用乌兰树木年轮重建托托河冬季气温序列[J]. 高原气象, 2003, 22(5): 518-523.
- [9] 王劲松, 李金豹, 陈发虎, 等. 树轮宽度记录的天山东段近 200 a 干湿变化[J]. 冰川冻土, 2007, 29(2): 209-216.
- [10] 王亚军, 陈发虎. 利用树轮资料重建黑河古径流的变化[J]. 河北建筑科技学院学报, 2002, 19(3): 60-62.
- [11] 王亚军, 陈发虎, 勾晓华. 祁连山中部地区树轮宽度与气候因子的相关分析及其重建[J]. 中国沙漠, 2001, 21(2): 135-140.
- [12] 白学平, 常永兴, 张先亮, 等. 近 30 年快速升温对两种典型小地形上兴安落叶松径向生长的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(12): 3853-3861.
- [13] 贺敏慧, 杨保, 秦春, 等. 青藏高原东北部与南部地区树木径向生长对气候要素的响应——以祁丰和林周树轮为例[J]. 中国沙漠, 2013, 33(4): 1117-1123.
- [14] Yang B, Qin C, Wang J, *et al.* A 3,500-year tree-ring record of annual precipitation on the northeastern Tibetan Plateau [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(8): 2903.
- [15] 郑永宏, 贺红, 李德龙, 等. 祁连山圆柏径向生长对气候要素响应的再分析[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(11): 180-184.

(编辑 潘秀华)