

## 干旱胁迫下保水剂对苹果幼苗生长和氮素吸收分配的影响

陈修森<sup>#</sup>, 肖伟<sup>#</sup>, 孙科鹏, 吴廷容, 冯一清, 付喜玲, 高东升, 陈修德<sup>\*</sup>

山东农业大学园艺科学与工程学院, 作物生物学国家重点实验室, 山东果蔬优质高效生产协同创新中心, 山东泰安271018

**摘要:**以两年生苹果幼苗‘红将军’/平邑甜茶为试材, 通过保水剂吸收<sup>15</sup>N-尿素溶液的方法, 研究了干旱条件下保水剂对苹果幼苗的生长及氮的吸收分配特性的影响。结果表明, 干旱条件下, 保水剂处理减少了根系生长的营养消耗; 干物质总量增加8.63%。保水剂处理的细根、粗根、一年生枝、叶的Ndff (%)值显著高于对照, 叶芽和花芽的Ndff (%)值显著低于对照。保水剂处理叶片的<sup>15</sup>N分配率升高20.04%, 粗根<sup>15</sup>N分配率降低16.15%。保水剂处理整株的尿素利用率升高52.38%, 除叶芽与细根外, 其他各部位尿素利用率均显著升高, 其中以叶片最为显著, 为85.8%。在干旱胁迫下, 保水剂的施用可以减少植物根系生长的营养消耗, 增加地上部的养分配累, 促进花芽形成; 增加同化物积累量, 优化同化产物分配格局, 将更多的同化产物用于地上部器官的生长发育, 促进植株的生殖生长和增加贮藏营养。

**关键词:** 苹果幼苗; 保水剂(SAP); 尿素; 干旱胁迫; 水肥耦合

保水剂(super absorbent polymers, SAP)是一种人工合成的具有超强吸水保水和释放水能力的高分子聚合物, 主要成分为聚丙烯酸盐和聚丙烯酰胺共聚体, 保水剂表面分子有吸附和离子交换的作用, 同样可用于肥料养分的吸持。保水剂主要应用在农作物、经济作物、荒山造林等方面。在干旱条件下, 使用保水剂会适当增加植株根系周围的土壤含水量, 可以有效减缓水分胁迫, 减少干旱胁迫对植株造成的伤害, 增加植株叶片的相对含水量和总叶绿素的含量(宫丽丹等2017), 还可以显著提高植株的抗干旱能力(马彦茹等2016)。在果树方面的研究表明, 在干旱胁迫下使用保水剂, 苹果、梨和桃的新梢生长量分别增加205.1%、11.8%和79.5%, 并且苹果叶面积增加(马焕成等2004; 刘春生等2003)。

氮素营养物质是植物体内重要组成部分, 对植物的生长发育起到了至关重要的作用。合理的氮素供应可以有效调控作物的抗旱能力, 尿素作为植物的重要氮源, 对植物的抗旱生理也具有重要的影响。余江敏等(2011)利用盆栽模拟干旱环境, 探究了有机和无机氮的比例对植株生长的影响, 结果表明适当的有机氮比例可以提高植株的水分利用率。氮素物质还可以间接影响植物的干旱生理代谢, 在干旱胁迫下硝态氮会影响植物体内一氧化氮的含量, 进而产生一系列适应干旱胁迫的生理反应(Zhang等2015)。

保水剂可以与多种肥料配合施用。李想等

(2016)将保水剂与有机肥配施, 研究了其对铁尾矿理化性质的改良作用, 结果表明保水剂与有机肥配施可以对铁尾矿区的土壤改良具有显著作用。郭世文等(2017)研究了在2种不同的土壤水分条件下, 保水剂与黄腐酸配施对盆栽玉米生长的影响, 结果表明保水剂与黄腐酸配施可以增产50%, 可使水分利用率提高90%。保水剂还具有提高肥料利用率的作用, 穆俊祥等(2016)研究了氮肥与保水剂配施对水肥利用和马铃薯生长的影响, 结果表明氮肥与保水剂配施可以明显提高马铃薯产量, 水肥利用率也有所提高。并且大量研究结果表明肥料与保水剂配施所取得的效果均明显优于单独施用(李想等2016; 刘迎春等2016; 冯波等2015)。

我国苹果产区主要分布在北方干旱半干旱地区, 且多数苹果园建立在山岭薄地区, 无灌溉条件或灌溉条件较差, 不能满足苹果正常生长发育对水分的需求, 即使具备灌溉条件, 也普遍存在灌溉方式不合理、水肥流失严重利用率低等问题, 严重影响了苹果正常生长发育和产量、品质的提高(路超等2011)。保水剂可以有效吸收和保持含盐水分(李扬2012), 并且具有吸水量大、吸持时间

修定 2018-06-06

资助 重大自然灾害监测预警与防范重点专项(2017YFC1502805)和山东省现代农业产业技术体系果品创新团队-栽培与土肥岗(SDAIT-06-01)。

<sup>#</sup> 并列第一作者。

<sup>\*</sup> 通讯作者(chenxiude@163.com)。

长、缓慢释放的特点,对于干旱条件下苹果的丰产、稳产具有重要意义。

旱地植物营养的基本问题是如何在水分受限的条件下合理施用肥料、提高水分利用效率,水肥之间的耦合效开始被人们重视。目前关于保水剂的研究大多集中于抗旱方面,关于保水剂与水肥互作的进一步研究较少。为研究保水剂在干旱条件下对肥水的调控机理及对果树生长发育的影响,本实验利用 $^{15}\text{N}$ 同位素示踪技术,研究了干旱条件下保水剂对两年生苹果幼苗生长发育的影响以及保水剂对苹果幼苗氮素的吸收分配情况,为保水剂的合理使用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验在于2015年6月到2016年11月在山东农业大学园艺试验站实施,供试苹果(*Malus pumila* Mill.)品种为‘红将军’,砧木为平邑甜茶(*Malus hupehensis* Rhed)。选取24株长势基本一致、无病虫害的两年生苹果苗进行盆栽,于2015年7月5日移栽于盆中。栽培基质为普通土壤(山东农业大学园艺试验站园土)与有机肥(腐熟羊粪)按照3:1比例配成,每盆栽栽培基质19 L。保水剂成分为聚丙烯酰胺,粒径3~5 mm。 $^{15}\text{N}$ -尿素由上海化工研究院生产,丰度为20%。

### 1.2 试验设计

保水剂处理组每株施用25 g保水剂。施用尿素包括 $^{15}\text{N}$ -尿素(0.95 g)和普通尿素(9 g),共9.95 g,混匀使用。先将尿素溶于2 L水中,然后将溶液全部由保水剂吸收。苹果苗定植时将已吸收尿素溶液的保水剂与栽培基质调匀后埋入花盆中。盆土表面5 cm使用栽培基质覆盖。每盆栽植1株苹果苗,每4株为一个处理,重复3次。

对照组不施用保水剂。先将尿素溶于2 L水,苹果苗定植时用栽培基质将树苗栽好后,再将2 L尿素溶液均匀浇入盆土中,其他处理同保水剂处理。

处理组与对照组于定植次日每盆追施磷酸氢二铵4.46 g、硫酸钾8.65 g,均做避雨处理,试验过程中不再浇水,其他均进行常规管理。

### 1.3 测定指标及方法

于定植次日,标记并测量所有新梢长度、株高、干周。

于处理后120 d,再次测量所有新梢长度、株高、干周,计算形成花芽个数,并对全部苹果苗进行破坏性取样。样品解析为花芽、叶芽、叶片、一年生枝、两年生枝、中干、粗根(直径 $\geq 2$  mm)和细根(直径 $< 2$  mm)。处理方法为:清水 $\rightarrow$ 洗涤剂 $\rightarrow$ 清水 $\rightarrow$ 1%盐酸 $\rightarrow$ 3次去离子水,按顺序冲洗后,115 $^{\circ}\text{C}$ 杀青30 min,80 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干,粉碎过100目筛,待测干重、全氮含量和 $^{15}\text{N}$ 丰度。

### 1.4 测定方法及计算公式

全氮含量(%)及 $^{15}\text{N}$ 丰度使用元素分析仪(山东农业大学农学院)测定。

$\text{Ndf}(\%) = [\text{植物样品中}^{15}\text{N}\text{丰度}(\%) - ^{15}\text{N}\text{自然丰度}(\%)] / [\text{肥料中}^{15}\text{N}\text{丰度}(\%) - ^{15}\text{N}\text{自然丰度}(\%)] \times 100$ 。

氮肥分配率(%) = 各器官从氮肥中吸收的氮量(g) / 总吸收氮量(g)  $\times 100$ 。

器官全氮量(g) = 器官生物量(g)  $\times$  氮含量(%)。

器官 $^{15}\text{N}$ 吸收量(g) =  $\text{Ndf} \times$  器官全氮量(g)。

氮肥利用率(%) = 器官 $^{15}\text{N}$ 吸收量(g) / 施肥量(g)  $\times 100$ 。

### 1.5 数据分析

使用Microsoft Excel 2010进行图表绘制,使用IBM SPSS Statistics 21软件采用单因素方差分析和差异性分析对实验数据进行统计分析。

## 2 实验结果

### 2.1 干旱胁迫下保水剂对两年生苹果幼苗生长发育的影响

#### 2.1.1 干旱胁迫下保水剂对苹果幼苗株高、干周、新梢和花芽生长的影响

由表1可以看出,保水剂处理组树体生长减缓,株高、干周、新梢生长量均比对照组小,且差异显著。保水剂处理组形成花芽个数是对照组的3倍,差异显著。说明保水剂在一定程度上减缓了树体营养生长,促进了生殖生长。

#### 2.1.2 干旱胁迫下保水剂对苹果幼苗各部位干重的影响

由表2可以看出,处理组各部位干重分布情况为叶片 $>$ 粗根 $>$ 中干 $>$ 细根 $>$ 两年生枝 $>$ 一年生枝 $>$ 叶芽 $>$ 花芽,对照组各部位干重分布情况为叶片 $>$ 粗根 $>$ 中干 $>$ 两年生枝 $>$ 细根 $>$ 一年生枝 $>$ 花芽 $>$ 叶芽,可见干物质均主要集中在叶片、粗根和中干。在地上部分,除叶芽外,处理组各部分干重均高于对

表1 干旱胁迫下保水剂对苹果幼苗生长发育的影响

Table 1 Effects of super absorbent polymers on the growth of apple seedlings under drought stress

处理	平均株高增长量/cm	平均干周增长量/mm	平均新梢增长量/cm	平均花芽形成数/个
对照	2.23 <sup>a</sup>	1.75 <sup>a</sup>	3.06 <sup>a</sup>	3 <sup>b</sup>
保水剂	0.53 <sup>b</sup>	1.59 <sup>b</sup>	2.11 <sup>b</sup>	9 <sup>a</sup>

同列数据后不同小写字母表示处理间差异达5%显著水平。下表同此。

表2 干旱胁迫下保水剂对苹果幼苗各部位干重的影响

Table 2 Effects of super absorbent polymers on the dry weight of different parts in apple seedlings under drought stress

处理	干重/g							
	花芽	叶芽	叶片	一年生枝	两年生枝	中干	粗根	细根
对照	0.19 <sup>b</sup>	0.30 <sup>a</sup>	125.31 <sup>b</sup>	3.99 <sup>b</sup>	8.36 <sup>b</sup>	46.77 <sup>a</sup>	81.69 <sup>a</sup>	19.18 <sup>a</sup>
保水剂	0.24 <sup>a</sup>	0.23 <sup>b</sup>	176.99 <sup>a</sup>	7.35 <sup>a</sup>	10.90 <sup>a</sup>	48.49 <sup>a</sup>	59.13 <sup>b</sup>	9.24 <sup>b</sup>

照组; 并且除中干外, 其它部位不同处理之间均差异显著。在地下部分, 处理组的粗根和细根干重均显著小于对照组。另外, 计算发现, 处理组干重根冠比为1:3.57, 对照组干重根冠比为1:1.83, 处理组根冠比低于对照组48.74%, 这与姚允聪等(2001)研究结果一致。

## 2.2 干旱胁迫下保水剂对苹果幼苗中氮素分配及利用率的影响

### 2.2.1 干旱胁迫下保水剂对苹果幼苗各部位Ndff (%)值的影响

Ndff (%)值反映的是所施氮肥对植株各部位所吸收氮的贡献率, 值越高, 说明该部位对所施氮肥的征调能力越强(顾曼如1990)。由表3可以看出, 在对照组中, 各部位Ndff (%)值顺序为花芽>叶芽>叶片>一年生枝>细根>粗根>两年生枝>中干; 在处理组中, 各部位Ndff (%)值顺序为花芽>细根>叶片>一年生枝>粗根>叶芽>中干>两年生枝。除叶片和一年生枝, 不同处理的其他各部位Ndff (%)值均差异显著。其中花芽Ndff (%)值最大, 中干Ndff (%)值最小。

由表3可知, 处理组叶片、一年生枝、中干、粗根、细根Ndff (%)值均高于对照组, 其他部位Ndff (%)值显著低于对照组, 说明保水剂处理增加尿素中的氮素在细根、粗根、一年生枝、叶片、中干所占比例, 其中细根的增幅最大, 为23.65%; 而在叶芽、花芽和两年生枝中所占比例降低, 其中叶芽降低11.69%, 花芽降低4.90%。处理组中叶芽的Ndff (%)值降低, 细根的Ndff (%)值升高, 表明保水剂的施用可以改变苹果幼苗各部位对尿素的吸收征调能力。处理组各部位Ndff (%)值分布有明显的趋中变化, 说明保水剂处理可以缓解各部位对尿素吸收征调能力的差距。

### 2.2.2 干旱胁迫下保水剂对苹果幼苗各部位<sup>15</sup>N分配率的影响

分配到植株各部位的<sup>15</sup>N占植株吸收全部<sup>15</sup>N百分比反映了<sup>15</sup>N在植株内的迁移积累规律, <sup>15</sup>N分配率也间接地反映了植株对尿素的吸收利用规律。由表4可知, 叶片是苹果幼苗最主要的氮素分配中心, 处理组叶片的<sup>15</sup>N分配率比对照组高20.04%, 说明保水剂的施用促进了叶片对氮素的

表3 干旱胁迫下保水剂对苹果幼苗各部位Ndff (%)值的影响

Table 3 Effects of super absorbent polymers on the Ndff (%) of different parts in apple seedlings under drought stress

处理	Ndff (%)值							
	花芽	叶芽	叶片	一年生枝	两年生枝	中干	粗根	细根
对照	2.04 <sup>a</sup>	1.58 <sup>a</sup>	1.54 <sup>a</sup>	1.53 <sup>a</sup>	1.12 <sup>a</sup>	0.97 <sup>b</sup>	1.28 <sup>b</sup>	1.48 <sup>b</sup>
保水剂	1.94 <sup>b</sup>	1.40 <sup>b</sup>	1.67 <sup>a</sup>	1.58 <sup>a</sup>	1.04 <sup>b</sup>	1.22 <sup>a</sup>	1.55 <sup>a</sup>	1.83 <sup>a</sup>

表4 干旱胁迫下保水剂对苹果幼苗各部位<sup>15</sup>N分配率的影响Table 4 Effects of super absorbent polymers on <sup>15</sup>N distribution in different parts of apple seedlings under drought stress

处理	<sup>15</sup> N分配率/%							
	花芽	叶芽	叶片	一年生枝	两年生枝	中干	粗根	细根
对照	0.10 <sup>b</sup>	0.14 <sup>a</sup>	52.41 <sup>b</sup>	1.86 <sup>a</sup>	1.43 <sup>b</sup>	10.95 <sup>a</sup>	26.05 <sup>a</sup>	5.99 <sup>a</sup>
保水剂	0.17 <sup>a</sup>	0.06 <sup>b</sup>	62.85 <sup>a</sup>	1.67 <sup>b</sup>	2.36 <sup>a</sup>	8.26 <sup>b</sup>	21.80 <sup>b</sup>	2.85 <sup>b</sup>

同化。处理组的粗根、细根<sup>15</sup>N分配率显著低于对照组,其中粗根降低了16.15%,细根降低了52.42%,表明对照组根系的生长更加旺盛,这与干旱对于对照组的胁迫比处理组更加严重有关。对照组地上部与根系的尿素分配率之比为2.12:1,处理组地上部与根系尿素分配率之比为3.06:1,说明保水剂可以促进氮素营养从根系向地上部迁移。

### 2.2.3 干旱胁迫下保水剂对苹果幼苗各部位尿素利用率的影响

氮素利用率是指作物吸收的肥料占所施肥料总氮的百分比。由表5可知,叶片的尿素利用率最高。对照组各部位尿素利用率高低顺序为叶片>粗根>中干>细根>两年生枝>一年生枝>叶芽>花芽,叶片尿素利用率显著高于其他部位,整株尿素利用率为6.28%。处理组各部位尿素利用率高低顺序为叶片>粗根>中干>细根>两年生枝>一年生枝>花芽>叶芽,叶片尿素利用率显著高于其他各部位,整株尿素利用率为9.66%。

处理组叶片尿素利用率显著高于对照,说明保水剂的施用促进了尿素向叶片的运输和积累。处理组粗根、中干、两年生枝、一年生枝、花芽的尿素利用率均高于对照组,细根、叶芽尿素利用率均低于对照组,均差异显著。处理组整株尿素利用率比对照组高52.38%,差异显著。

## 3 讨论

植物在受到养分胁迫时,往往通过发生形态

变化或者生理变化以适应外界胁迫对自身生长的影响。形态变化的主要方式是改变地上部与根系的比例关系,以实现限制养分的最大吸收速率,促进营养生长(Chapin 2002);生理变化的主要方式是通过调节体内的同化物分配格局,协调各部位氮的吸收与碳的消耗关系,以达到最大的养分吸收利用效率(吴楚等2004)。

### 3.1 干旱胁迫下保水剂对苹果幼苗形态变化的影响

保水剂的施用可以直接影响植株地上部与地下部的器官形态发生变化。郭建芳(2005)研究表明,保水剂与尿素互作可以促进作物的生长,使谷子的株高、叶面积等指标显著增加。徐刚等(2012)研究表明,保水剂与氮肥结合可以提高辣椒地上及地下各部分的干重。本实验中,处理组株高、干周、新梢长度的增长量均低于对照组,地上各部位干重明显增加,根系干重明显低于对照组,与前二者试验明显不同。主要是由于对照组苹果幼苗定植时直接浇灌尿素溶液,初期短时间内肥水充足,长势比较旺盛,植株新梢、干周和株高迅速增加;随着土壤中的水分迅速消耗散失,苹果苗很快陷入严重的干旱胁迫,长势受到抑制。处理组苹果幼苗定植时,尿素溶液是通过吸收储存在保水剂中的,保水剂中的水分和尿素的释放是一个长期而又缓慢的过程(耿桂俊等2011),从而导致处理组苹果幼苗在生长初期受到了一定程度的干旱胁迫,长势较弱;在生长后期随着水分和尿素的释放,处理组苹果幼苗所面临的干旱胁迫轻

表5 干旱胁迫下保水剂对苹果幼苗各部位尿素利用率的影响

Table 5 Effects of super absorbent polymers on urea distribution in different parts of apple seedlings under drought stress

处理	尿素利用率/%							
	花芽	叶芽	叶片	一年生枝	两年生枝	中干	粗根	细根
对照	0.05 <sup>b</sup>	0.09 <sup>a</sup>	3.32 <sup>b</sup>	0.12 <sup>b</sup>	0.09 <sup>b</sup>	0.69 <sup>b</sup>	1.66 <sup>b</sup>	0.38 <sup>a</sup>
保水剂	0.16 <sup>a</sup>	0.06 <sup>b</sup>	6.17 <sup>a</sup>	0.18 <sup>a</sup>	0.22 <sup>a</sup>	0.77 <sup>a</sup>	2.04 <sup>a</sup>	0.27 <sup>b</sup>

于对照组, 植株可以维持较长时间的正常生长。因此, 初期短时间内对照组肥水充足, 处理组受到干旱胁迫, 是导致处理组株高、干周和新梢长度的增长量均低于对照组的主要原因。

植物的光合作用是养分积累的重要途径, 积累的碳素物质是植物干重的重要组成部分(韩玉玲等2012)。本实验中, 处理组总干重显著高于对照组, 与前人研究相一致。对照组的新梢、干周和株高的增长量高于处理组, 对照组地上部分的干重均低于处理组, 说明保水剂的使用缓解了干旱胁迫, 间接促进了光合作用的进行, 增加了处理组的养分积累, 干重较对照组有显著提高。

在发生干旱胁迫时, 植物将通过调节生长速率、细胞渗透势、抗氧化防御系统和自身结构等对干旱胁迫做出响应, 这些变化会直接导致植物的生物化学和生长等过程发生相应的适应性改变(Duan和Li 2007)。根冠比增大是植物适应干旱胁迫的主要形态变化, 对照组的根冠比显著高于处理组, 这与姚允聪等(1999)研究结果一致, 说明处理组削弱了干旱胁迫对树体的影响。而对对照组的根系干重显著高于处理组, 这与姚允聪等(1999)研究结果不一致, 主要原因是对照组前期水分充足, 在适宜的氮肥营养条件下, 为根系的生长提供了有利条件, 促进了根系干重的积累(姚允聪等1999)。处理组在整个生长过程中水肥条件相对一致, 在生长初期没有充足的水肥供应而导致其根系生长缓慢。

表1和2表明, 在干旱条件下, 保水剂可以增加养分积累, 对短期内肥水过大起到很好的缓冲作用, 在一定程度上减小根冠比, 使更多的光合产物用于地上部分的生长, 促进植株的营养生长。

### 3.2 干旱胁迫下保水剂对苹果幼苗生理变化的影响

干旱条件下, 保水剂与水、肥耦合施用后可以缓和树势, 防止旺长, 促进花芽形成。C/N对果树花芽的分化与形成至关重要, 其比值越大越有利于花芽分化, 显著增加果树成花率。本实验中, 对照组前期旺长, 对水肥的消耗较快, 在体内积累大量的氮素营养。生长中后期在干旱胁迫下, 大量的光合产物优先用于根系生长, 不利于花芽的分化; 处理组由于保水剂前期吸存和缓慢释放的特性, 使植物在整个生长周期内处在一个相对稳

定的水肥条件下, 长势较对照组相对缓和, 用于根系生长的同化物相对减少。因此, 处理组地上部分同化产物积累量高, 有利于花芽的分化。

氮素是植物体内蛋白质、核酸等物质的重要组成元素, 优先分配在生命活动旺盛的各个部位。由表4可以看出, 在干旱条件下, 叶片仍然是苹果幼苗最主要的氮素分配中心, 处理组中保水剂的施用缓解了干旱胁迫, 使得叶片的 $^{15}\text{N}$ 分配率得到显著提高, 同时还减小了处理组的根系生长量, 进而显著降低了处理组根系的 $^{15}\text{N}$ 分配率, 使得处理组粗根、细根的 $^{15}\text{N}$ 分配率相对于对照组分别降低了12.7%和52.4%。有研究表明, 苹果花芽数量随叶片中氮含量的增加而增加(Mohamed等1986), 本实验中处理组花芽数量比对照组高200%, 与前人研究结果一致。干旱条件下保水剂施用可以增加同化物积累量, 优化同化产物分配格局, 将更多的同化产物用于地上部器官的生长发育, 有利于促进植株的生殖生长和增加贮藏营养。

干旱条件下保水剂的施用为苹果幼苗的生长创造了相对稳定的适宜环境, 有利于植株对尿素的吸收和同化。一般情况下夏施氮肥的肥效发挥较快, 流失也快(顾曼如等1986)。本实验中处理组尿素利用率较高, 为9.66%, 对照组尿素利用率较低, 为6.28%。相对于Hill-Cottingham和Lloyd-Jones (2010)的研究, 处理组与对照组的尿素利用率均较低, 因为尿素的转化速率与土壤含水量、土壤酸碱度、温度等因素有关, 同时也受施肥方式和土壤类型等因素的影响, 从而导致不同实验的尿素利用率存在差异。处理组整株的尿素利用率比对照组高52.38%, 除了叶芽与细根外, 其他各部位尿素利用率处理组均高于对照组, 其中以叶片最为显著, 说明干旱条件下保水剂的使用有利于苹果幼苗对尿素的吸收和利用。

### 参考文献(References)

- Hill-Cottingham DG, Lloyd-Jones CP (2010). Nitrogen - 15 in apple nutrition investigations. *J Sci Food Agric*, 26 (2): 165-173
- Duan B, Li C (2007). Interactions between water deficit, ABA, and provenances in *Picea asperata*. *J Exp Bot*, 58 (11): 3025-3036
- Fend B, Li GF, Li ZX, et al (2015). Effects of different sizes of water retaining agent combined with nitrogen fertilizer

- on wheat photosynthetic characteristics and grain yield. *Shandong Agric Sci*, 47 (9): 80–84 (in Chinese with English abstract) [冯波, 李国芳, 李宗新等(2015). 不同粒径保水剂结合氮肥施用对小麦光合特性及产量的影响. *山东农业科学*, 47 (9): 80–84]
- Geng GJ, Bai G, Du SN, et al (2011). Effects of super absorbent with different application methods on soil moisture, soil salinity and *Lycopersicon esculentum* growth. *Sci Soil Water Conserv*, 9 (3): 65–70 (in Chinese with English abstract) [耿桂俊, 白岗栓, 杜社妮等(2011). 保水剂施用方式对土壤水盐及番茄生长的影响. *中国水土保持科学*, 9 (3): 65–70]
- Gong LD, Ni SB, He XY, et al (2017). Effects of hydrogel on macadamia growth and its moisture characteristic parameters under drought stress. *Tropic Agric Sci Technol*, 40 (1): 17–19 (in Chinese with English abstract) [宫丽丹, 倪书邦, 贺熙勇等(2017). 干旱胁迫下保水剂对澳洲坚果生长及水分特征参数的影响. *热带农业科技*, 40 (1): 17–19]
- Gu MR (1990). Application of  $^{15}\text{N}$  in the study of nitrogen nutrition of apple. *China Fruits*, (2): 46–48 (in Chinese) [顾曼如(1990).  $^{15}\text{N}$ 在苹果氮素营养研究中的应用. *中国果树*, (2): 46–48]
- Gu MR, Shu HR, Zhou HW (1986). A study on the untrition of apple trees IV—the characters of translocation and distribution of the reserved  $^{15}\text{N}$ . *Acta Horti Sin*, (1): 25–30 (in Chinese with English abstract) [顾曼如, 束怀瑞, 周宏伟(1986). 苹果氮素营养研究IV. 贮藏 $^{15}\text{N}$ 的运转、分配特性. *园艺学报*, (1): 25–30]
- Guo JF (2005). The study on slowly-release effectiveness of urea effected by water retaining agent (dissertation). Taigu: Shandong Agriculture University (in Chinese with English abstract) [郭建芳(2005). 保水剂对尿素缓释效应的研究(学位论文). 太谷: 山西农业大学]
- Guo SW, Li PF, Lu L, et al (2017). Maize (*Zea mays*) growth, water consumption and water use efficiency by application of a super absorbent polymer and fulvic acid under two soil moisture conditions. *J China Agric Univ*, 22 (1): 1–11 (in Chinese with English abstract) [郭世文, 李品芳, 芦谅等(2017). 不同土壤水分条件下施用黄腐酸与保水剂对玉米生长、耗水及水分利用效率的影响. *中国农业大学学报*, 22 (1): 1–11]
- Han YL, Xu G, Gao WR, et al (2012). Effects of super absorbent polymers (SAP) on growth and photosynthesis of pepper plants under water stress. *Acta Bot Boreali-Occident Sin*, 32 (6): 1191–1197 (in Chinese with English abstract) [韩玉玲, 徐刚, 高文瑞等(2012). 保水剂对水分胁迫下辣椒生长及光合作用的影响. *西北植物学报*, 32 (6): 1191–1197]
- Li X, Zhang BJ, Li JQ, et al (2017). Effects of combined application of water retention agent and organic fertilizer on physico-chemical properties of iron tailings. *Chin J Applied Ecol*, 28 (2): 554–562 (in Chinese with English abstract) [李想, 张宝娟, 李继泉等(2017). 保水剂与有机肥配施对铁尾矿理化性质的改良作用. *应用生态学报*, 28 (2): 554–562]
- Liu CS, Yang JH, Ma YZ, et al (2003). Effects research of drought-resistant and water-absorbent polymer applied in orchard. *J Soil Water Conserv*, 17 (2): 134–136 (in Chinese with English abstract) [刘春生, 杨吉华, 马玉增等(2003). 抗旱保水剂在果园中的应用效应研究. *水土保持学报*, 17 (2): 134–136]
- Liu YC, Ding SR, Re LL (2016). Effects of water-retaining agent+conventional application on agronomic traits and yield of common buckwheat. *Guizhou Agric Sci*, 44 (3): 56–58 (in Chinese with English abstract) [刘迎春, 丁素荣, 任丽莉(2016). 保水剂配施常规肥对荞麦农艺性状和产量的影响. *贵州农业科学*, 44 (3): 56–58]
- Lu C, Wang JZ, Xue XM, et al (2011). Effects of three irrigation methods on growth, yield and quality of adult apple trees. *Deciduous Fruits*, 43 (6): 7–14 (in Chinese) [路超, 王金政, 薛晓敏等(2011). 三种灌溉方式对成龄苹果树体生长发育和产量及品质的影响. *落叶果树*, 43 (6): 7–14]
- Ma HC, Luo ZB, Chen YQ, et al (2004). Hydrogels role in retention of nutrients in soil. *J Zhejiang For Coll*, 21 (4): 404–407 (in Chinese with English abstract) [马焕成, 罗质斌, 陈义群等(2004). 保水剂对土壤养分的保蓄作用. *浙江林学院学报*, 21 (4): 404–407]
- Ma YR, Wu XL, Ge CH, et al (2016). Influence of water retention agent applied on physiological and biochemical index of cotton plant under drought condition. *Xinjiang Agric Sci*, 53 (2): 277–282 (in Chinese with English abstract) [马彦茹, 吴湘琳, 葛春辉等(2016). 干旱胁迫条件下施用保水剂对棉花植株生理生化的影响. *新疆农业科学*, 53 (2): 277–282]
- Mohamed T, Lombard PB, Righetti TL (1986). Effect of urea nitrogen on fruitfulness and fruit quality of starkspur golden delicious apple trees. *J Plant Nutr*, 9 (1): 75–85
- Mu JX, Cao XM, Liu SC (2016). Effects of combined application of water-retaining agent and nitrogen fertilizer on growth and water and fertilizer utilization of potato. *J Henan Agric Sci*, 45 (9): 35–40 (in Chinese with English abstract) [穆俊祥, 曹兴明, 刘拴成(2016). 保水剂和氮肥配施对马铃薯生长和水肥利用的影响. *河南农业科学*, 45 (9): 35–40]

- Wu C, Wang ZQ, Fan ZQ, et al (2004). Effects of nitrogen stress on nutrient uptake by *Fraxinus mandshurica* seedlings and their biomass distribution. *Chin J Appl Ecol*, 15 (11): 2034–2038 (in Chinese with English abstract) [吴楚, 王政权, 范志强等(2004). 氮胁迫对水曲柳幼苗养分吸收、利用和生物量分配的影响. *应用生态学报*, 15 (11): 2034–2038]
- Xu G, Han YL, Gao WR, et al (2012). Effects of combination of super absorbent polymers (SAP) with nitrogen fertilizer on growth and photosynthesis of pepper plants. *Jiangsu J Agric Sci*, 28 (4): 823–827 (in Chinese with English abstract) [徐刚, 韩玉玲, 高文瑞等(2012). 保水剂与氮肥结合对辣椒生长及光合作用的影响. *江苏农业学报*, 28 (4): 823–827]
- Yao YC, Gao XH, Cheng JH (2001). Study on Identification of drought resistance of several apple species. VII changes of the growth and the leaf morphological character of young apple trees under the soil drought. *J Beijing Agric College*, 16 (2): 16–22 (in Chinese with English abstract) [姚允聪, 高遐虹, 程继鸿(2001). 苹果种质资源抗旱性鉴定研究VII. 干旱条件下苹果幼树生长与叶片形态特征变化. *北京农学院学报*, 16 (2): 16–21]
- Yao YC, Zhang DP, Wang YN (1999). Study on the photosynthesis rate and the accumulation of dry substances in young apple tree under water stresses. Selected Chinese Academy of Horticulture 70th Anniversary Excellent Paper Selection (in Chinese with English abstract) [姚允聪, 张大鹏, 王有年(1999). 水分胁迫条件下苹果属植物的光合活性与干物质积累的研究. *中国园艺学会成立70周年纪念优秀论文选编*]
- Zhang LX, Zheng P, Ruan Z, et al (2015). Nitric oxide accumulation and glycinebetaine metabolism in two osmotically stressed maize cultivars supplied with different nitrogen forms. *Biol Plant*, 59 (1): 1–4

## Effects of super absorbent polymers on growth and nitrogen absorption and distribution of apple seedlings under drought stress

CHEN Xiu-Miao<sup>#</sup>, XIAO Wei<sup>#</sup>, SUN Ke-Peng, WU Ting-Rong, FENG Yi-Qing, FU Xi-Ling, GAO Dong-Sheng, CHEN Xiu-De<sup>\*</sup>

*State Key Laboratory of Crop Biology, Shandong Collaborative Innovation Center for Fruit and Vegetable Production with High Quality and Efficiency, College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China*

**Abstract:** The effects of super absorbent polymers on growth and nitrogen absorption and distribution characteristics of two-year-old apple seedlings were studied by taking 'Red General' apple trees (rootstock *Malus × hupehensis*) as test materials and using super absorbent polymers to absorb <sup>15</sup>N-urea solution. The results showed that under drought conditions, the super absorbent polymers treatment reduced the nutrition consumption of root growth. The total dry matter increased by 8.63%. The Ndff (%) values of <sup>15</sup>N in fine roots, thick roots, annual branches and leaves treated with super absorbent polymers were significantly higher than those of the control, while the Ndff (%) values of leaf buds and flower buds were significantly lower than those of the control. The distribution rate of <sup>15</sup>N in leaves increased by 20.04% and in thick roots decreased by 16.15% in the treatment group. The urea utilization rate of the whole plant in the treatment group increased by 52.38%, except for leaf buds and fine roots, the urea utilization rate of all other parts increased significantly, of which the leaf was the most significant, accounting for 85.80%. Under drought stress, the application of super absorbent polymers can reduce the nutrient consumption of plant root growth, increase the nutrient accumulation in the aboveground and promote the formation of flower buds, while increasing the accumulation of assimilates, optimizing the distribution pattern of assimilates, using more assimilates for the growth and development of aboveground organs, promoting the reproductive growth of plants and increasing the storage nutrition.

**Key words:** apple seedling; super absorbent polymers; urea; drought stress

---

Accepted 2018-06-06

This work was supported by the National Key R&D Program on Monitoring, Early Warning and Prevention of Major National Disaster (2017YFC1502805) and Shandong Province Modern Agricultural Industry Technology System Innovation Team- Cultivation, Soil and Fertilizer (SDAIT-06-01).

<sup>#</sup>Co-first authors.

<sup>\*</sup>Corresponding author (chenxiude@163.com).