



刘晓嘉,唐雪东,刘海广,等.土壤改良对越橘根域细胞分裂素含量及年变化规律的影响[J].华南农业大学学报,2016,35(6):52-57.

# 土壤改良对越橘根域细胞分裂素含量 及年变化规律的影响

刘晓嘉,唐雪东,刘海广,吴林,张志东,李亚东

(吉林农业大学园艺学院,吉林长春130118)

**摘要:**【目的】研究不同土壤改良物质对越橘 *Vaccinium vitis-idaea* 根际土和非根际土中细胞分裂素[玉米素(Z)、玉米素核苷(ZR)和异戊烯基腺苷(iPA)]含量及年变化规律的影响。【方法】以2年生盆栽越橘为试材,应用“根际微区土壤剥落分离法”收集与根系黏着程度不同的非根际土和根际土样品,用高效液相色谱法测定土壤样品细胞分裂素含量。【结果和结论】不同根域处理的根系分泌物中,玉米秸秆配施氮肥处理(k4)的细胞分裂素含量最高,其他依次为添加玉米秸秆处理(k3)、添加草炭处理(k2)、无添加(k1,对照);不同时期越橘根际土和非根际土中细胞分裂素含量总趋势为Z>ZR>iPA,如k4处理的Z、ZR和iPA平均质量比分别为9.89、9.76和3.57 ng/g,分别比k1(对照)高出67.9%、84.2%和105.6%。越橘根系细胞分裂素含量年变化规律表现为早春时期呈上升趋势,秋末季节含量呈下降趋势,而在早春至秋末之间,根系分泌物含量较高。

**关键词:**越橘;土壤改良;根系分泌物;细胞分裂素

中图分类号:S663;S154.2

文献标志码:A

文章编号:1001-411X(2014)06-0052-06

## The influence of soil amendments on cytokinin contents and their annual variations in the root zone of *Vaccinium vitis-idaea*

LIU Xiaojia, TANG Xuedong, LIU Haiguang, WU Lin, ZHANG Zhidong, LI Yadong

(College of Horticulture, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

**Abstract:**【Objective】The contents and annual variations of cytokinins including zeatin (Z), zeatin riboside (ZR) and isopentenyl adenodine (iPA) were studied in the rhizosphere and non-rhizosphere of blueberry, *Vaccinium vitis-idaea* ‘Northland’ after the application of different soil amelioration materials in pots. 【Method】Rhizosphere and non-rhizosphere soil samples with different root adhesion degrees were collected by rhizosphere soil stripping separation method, high performance liquid chromatography methods were used to investigate cytokinin contents in soil samples. 【Result and conclusion】Cytokinin contents of corn stalks mixed with nitrogen fertilizer(k4) were the highest, followed by the application treatments of corn stalks(k3), peat(k2), and no added (k1, control). The general trend of cytokinin contents in blueberry rhizosphere and non rhizosphere soil were Z>ZR>iPA in different periods, such as k4 treatment the Z, ZR and iPA average content was 9.89, 9.76 and 3.57 ng/g respectively, which were higher than 67.9%, 84.2% and 105.6% compared with the control, respectively. The annual variations of cytokinins in the root zone of blueberry were traced. The contents of cytokinins increased in early spring and

收稿日期:2013-05-21 优先出版时间:2014-07-21

优先出版网址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20141003.1243.018.html>

作者简介:刘晓嘉(1974—),女,实验师,硕士, E-mail:lxjtang@163.com; 通信作者:唐雪东(1969—),男,副教授,博士, E-mail:tangxd94@126.com

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201103037);吉林省教育厅科学技术研究项目(吉教科合字2013第48号);长春市科技局科技支撑项目(2011204)

declined in autumn, while between in early spring and late autumn they maintained high levels.

**Key words:** *Vaccinium vitis-idaea*; soil improvement; root exudate; cytokinin

越橘 *Vaccinium vitis-idaea* 为杜鹃花科 Ericaceae 越橘属 *Vaccinium* 植物,为多年生灌木.其果实色泽美观,富含多种维生素及微量元素,具有极高的营养价值和医疗保健作用<sup>[1]</sup>.越橘生长需要疏松湿润、有机质含量高的强酸性土壤,而我国很多地区的土壤为中性或微酸性,有机质含量低,需通过人工调酸和补充有机质来改善土壤理化性状才能进行越橘的栽培<sup>[2]</sup>.不同土壤改良物质影响土壤理化性质特别是土壤有机质的含量,进而影响根系的生长发育及土壤中微生物种类与数量,而根系是产生细胞分裂素(CTK)的主要部位,微生物是土壤中植物激素的来源之一<sup>[3]</sup>.国内外关于不同土壤改良物质对根系分泌物影响的研究报道主要集中在苹果和草莓<sup>[4-5]</sup>等植物上,对越橘根系分泌物的研究很少,有关越橘根系分泌物中细胞分裂素的研究更鲜见报道.本试验以2年生盆栽越橘为试材,研究不同土壤改良物质对越橘根际土和非根际土细胞分裂素[玉米素(Z)、玉米素核苷(ZR)和异戊烯基腺嘌呤核苷(iPA)]的含量及年变化规律的影响,以期为今后越橘根系分泌物及根际营养等方面的研究提供理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

试验于2009年3—10月在吉林农业大学园艺学院及吉林农业大学试验中心进行.供试植物为2年生越橘品种‘北陆’(Northland),供试土壤为生长健壮的盆栽2年生越橘品种‘北陆’苗木的根际土和非根际土.

### 1.2 试验处理

试验设4个不同根域处理,分别为k1(对照):园田土+硫磺粉(1.0 kg/m<sup>3</sup>);k2:园田土+硫磺粉+草炭;k3:园田土+硫磺粉+玉米秸秆(经粉碎);k4:园田土+硫磺粉+玉米秸秆+氮肥.草炭与园田土或玉米秸秆与园田土均按1:1的体积比(草炭或玉米秸秆的干质量为园田土的5%)混拌均匀.k4处理加入氮肥(尿素)的纯氮量为玉米秸秆质量的1%,即每盆4 g纯氮量.各处理分别施入等量磷肥(过磷酸钙),纯磷量占纯氮量的1/3,即每盆施P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 5 g.各处理再分别加入硫磺粉1 kg/m<sup>3</sup>,充分混拌均匀后栽植苗木.每个处理5株,重复5次,共计25株.采用统一的常规田间管理.

### 1.3 试验方法

1.3.1 土壤样品的采集 本试验应用“根际微区土壤剥落分离法”收集与根系黏着程度不同的非根际土和根际土样品,分别于萌芽期(G,2009-04-10)、新梢旺长期(A,2009-05-10)、新梢停长期(B,2009-06-15)、果实成熟期(C,2009-07-10)、落叶期(D,2009-09-20)、休眠期(E,2010-01-15)进行土壤样品采集.每次从小区中选取生长健壮一致的植株3~4株,并小心从盆中挖出以获得完整根系,除去根间大量的土壤,然后轻抖,将人工轻轻抖落下来的土壤视为非根际土,将附着于根系上的土壤和挂在根系上的土壤小团块视为根际土,将根际土和非根际土分别抖落在塑料布上,分别混合均匀后,迅速装入塑料袋内,放冰桶中带回,贮存于-20℃冰箱中.

1.3.2 细胞分裂素的提取和测定 细胞分裂素提取<sup>[6]</sup>:将10 g土样置于三角瓶中,加入体积分数为80%的冰冻甲醇25 mL并摇匀,冰浴中浸提12 h,过滤并收集滤液,残渣用体积分数为80%冰冻甲醇10 mL洗2次,合并滤液,用体积分数为80%冰冻甲醇定容至50 mL.

细胞分裂素纯化:将滤液在40℃条件下减压浓缩至水相,用0.1 mol/L HCl调pH至3.0,过阳离子交换柱Dowex 50,先用重蒸馏水洗柱,后用10 mL的3 mol/L NH<sub>4</sub>OH洗脱,收集洗脱液并减压蒸去NH<sub>3</sub>,用0.1 mol/L NaOH调pH至8.0,用体积比1:1水饱和正丁醇萃取3次,水相弃去,合并正丁醇相,于40℃条件下减压浓缩至干,用3 mL重蒸优质甲醇洗出,用液相色谱进行分析.

细胞分裂素测定:采用高效液相色谱法<sup>[7]</sup>,标样Z、ZR和iPA为Sigma公司产品.仪器条件:Bio-Rad Aminex HPX-87H色谱柱(300 mm×7.8 mm);流动相中,甲醇与冰醋酸水溶液(pH 3.5)体积比为78:22;流速1 mL/min;二极管阵列检测器(DAD)检测波长270 nm;进样量10 μL.

### 1.4 数据处理

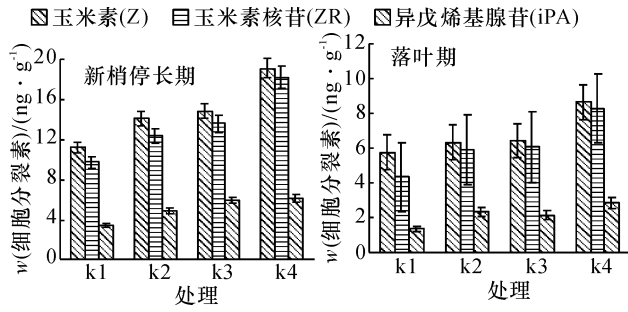
用Microsoft excel 2003和DPS软件9.50进行数据分析,采用新复极差法进行差异显著性检验.

## 2 结果与分析

### 2.1 越橘根际土细胞分裂素含量变化

由图1可知,不同时期越橘根际土中细胞分裂素的含量总趋势为Z>ZR>iPA,其中Z和ZR含量明显

高于 iPA 含量. 在整个生长期, 不同根域处理的 3 种细胞分裂素的总量表现为  $k_4 > k_3 > k_2 > k_1$ ,  $k_4$  处理的 Z, ZR 和 iPA 平均质量分数分别为 9.89、9.76 和 3.57  $\text{ng/g}$ , 分别比  $k_1$  处理高出 67.9%、84.2% 和 105.6%.



$k_1$ : 园田土 + 硫磺粉;  $k_2$ : 园田土 + 硫磺粉 + 草炭;  $k_3$ : 园田土 + 硫磺粉 + 玉米秸秆;  $k_4$ : 园田土 + 硫磺粉 + 玉米秸秆 + 氮肥.

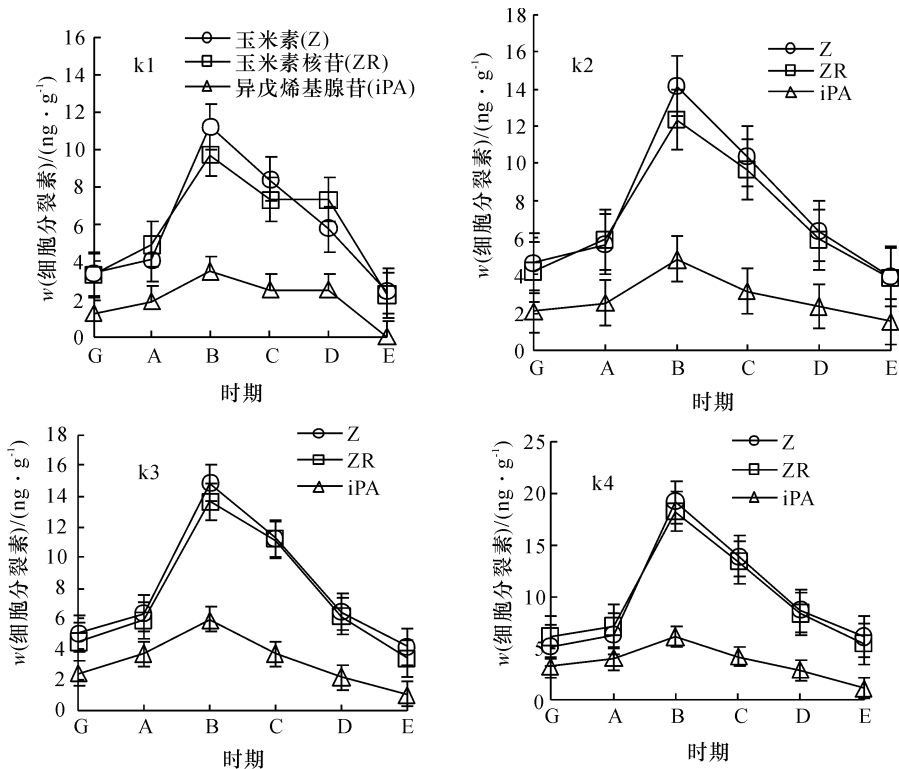
图1 越橘不同根域处理的根际土细胞分裂素含量

Fig.1 Contents of different forms of cytokinins in *Vaccinium vitis-idaea* rhizosphere under different treatments

从图2可看出, 从萌芽期开始, 不同根域处理越橘根际土中 Z, ZR 和 iPA 质量分数均呈上升趋势, 其中 Z 和 ZR 上升迅速, iPA 上升较平缓, 均于新梢停长期 (B) 形成最高峰, 如  $k_4$  处理分别为 19.16、18.24 和 6.11  $\text{ng/g}$ , 比萌芽期 (G) 分别高出 269.88%、

203.46% 和 93.97%; 新梢停长期后, Z, ZR 和 iPA 含量开始下降, 其中 Z 和 ZR 下降迅速, iPA 下降平缓, 于休眠期 (E) 降到低谷, 如  $k_1$  处理在休眠期 iPA 未检出.

从上述分析看出, 在年周期中, 越橘根际土中 Z, ZR 和 iPA 的含量均形成一次高峰. 早春时期, 细胞分裂素 (Z, ZR 和 iPA) 迅速上升, 于新梢停长期形成全年最高峰, 这与越橘树体物候期变化和细胞分裂素是生长发育调节物质有关. 从 3 月到 7 月正值果树萌芽、新梢生长、开花坐果、根系生长、花芽分化等物候变化最集中、最活跃的时期, 细胞分裂素作为一种内源激素主要是由根系合成, 然后运输至地上部促进细胞的分裂和分化, 进而形成各种组织和器官. 随着根系活动增强, 根系合成和分泌细胞分裂素的能力也迅速增强, 并于根系生长高峰期形成全年最高峰. 新梢停长期以后, Z, ZR 和 iPA 含量迅速下降, 这表明随着根系活动减弱, 逐渐转向休眠, 根系合成和分泌细胞分裂素的能力逐渐降低或停止. 另外, 在周年变化中 Z 和 ZR 含量明显高于 iPA 含量, 而且变化也较剧烈, 这可能是因为 Z 和 ZR 与 iPA 在根系内的合成代谢和分泌生理有差异, 或者是它们与越橘树体的各种物候变化有不同的内在联系.



G: 萌芽期(2009-04-10); A: 新梢旺长期(2009-05-10); B: 新梢停长期(2009-06-15); C: 果实成熟期(2009-07-10); D: 落叶期(2009-09-20); E: 休眠期(2010-01-15).

$k_1$ : 园田土 + 硫磺粉;  $k_2$ : 园田土 + 硫磺粉 + 草炭;  $k_3$ : 园田土 + 硫磺粉 + 玉米秸秆;  $k_4$ : 园田土 + 硫磺粉 + 玉米秸秆 + 氮肥.

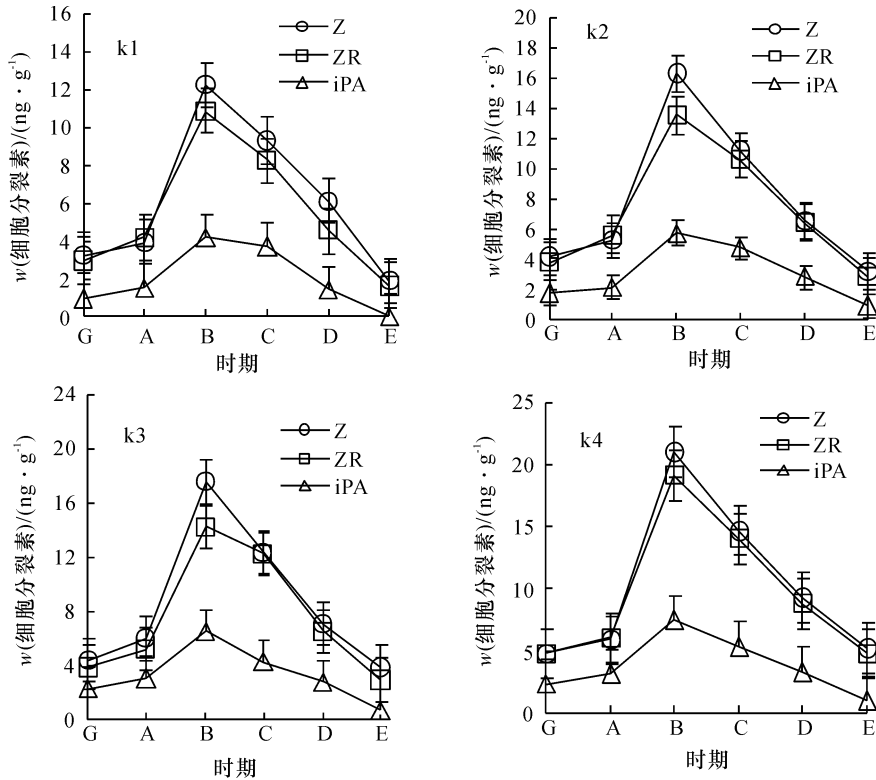
图2 不同根域处理越橘根际土细胞分裂素含量动态变化

Fig.2 Dynamic changes of cytokinin contents in *Vaccinium vitis-idaea* rhizosphere under different treatments

### 2.2 越橘非根际土细胞分裂素含量变化

从图3可见,不同时期越橘非根际土中细胞分裂素含量和年变化规律与根际土相同,如:3种细胞分裂素含量的总趋势也为  $Z > ZR > iPA$ ,其中Z和

ZR含量同样明显高于iPA含量;在整个生长期,不同根域处理非根际土3种细胞分裂素的质量分数也表现出  $k4 > k3 > k2 > k1$  的趋势。



图中,G:萌芽期(2009-04-10);A:新梢旺长期(2009-05-10);B:新梢停长期(2009-06-15);C:果实成熟期(2009-07-10);D:落叶期(2009-09-20);E:休眠期(2010-01-15)。

k1:园田土硫磺粉;k2:园田土+硫磺粉+草炭;k3:园田土+硫磺粉+玉米秸秆;k4:园田土+硫磺粉+玉米秸秆+氮肥。

图3 不同根域处理越橘非根际土细胞分裂素含量动态变化

Fig.3 Dynamic changes of cytokinin contents in *Vaccinium vitis-idaea* non-rhizosphere soil under different treatments

### 2.3 越橘根际土和非根际土中细胞分裂素总量变化

如表1所示.不同根域处理越橘根际土和非根际土中细胞分裂素总量的平均含量均为  $k4 > k3 > k2 >$

表1 不同时期不同根域处理细胞分裂素总量变化<sup>1)</sup>

Tab.1 Changes in the total cytokinin content in *Vaccinium vitis-idaea* rhizosphere under different treatments

处理 <sup>2)</sup>	根域 土壤	$w(\text{细胞分裂素})/(\text{ng} \cdot \text{g}^{-1})$						平均值
		萌芽期	新梢旺长期	新梢停长期	果实成熟期	落叶期	休眠期	
k1	根际土	7.88aA	10.90abA	24.43aA	18.26aA	11.50aA	4.61abA	12.93aA
	非根际土	7.21aA	9.80aA	27.35abA	21.31abA	12.12aA	3.54aA	13.56abA
k2	根际土	10.94cA	14.06bcB	31.40bA	23.18bA	14.62bB	9.34cA	17.26bB
	非根际土	9.80bA	13.04bB	35.53bcB	26.47cB	15.70bcB	6.92bB	17.91bB
k3	根际土	11.90cA	15.93cdB	34.41bcB	26.08cB	14.66bB	8.49cB	18.58bcB
	非根际土	10.54bcA	14.23cB	38.27cB	28.87cdB	16.34cB	7.38bB	19.27cB
k4	根际土	14.40cB	17.48dC	43.51dC	31.41dC	19.84dC	12.72edC	23.23dC
	非根际土	11.97cA	15.11cdB	47.77eC	34.23eC	21.49eC	10.97dC	23.59dC

1) 同列中,相同处理的数据后面凡具有相同大写或小写英文字母者,分别表示0.01水平或0.05水平上差异不显著(新复极差法).2) k1:园田土+硫磺粉;k2:园田土+硫磺粉+草炭;k3:园田土+硫磺粉+玉米秸秆;k4:园田土+硫磺粉+玉米秸秆+氮肥。

k1,如:k4处理根际土和非根际土细胞分裂素质量分数最高,分别为23.23和23.59 ng/g,最低为k1处理,分别为12.93和13.56 ng/g.在年生长周期中,根际土和非根际土中细胞分裂素总量变化趋势基本一致.从萌芽期开始根际土和非根际土中细胞分裂素含量迅速上升,并于新梢停长期形成最高峰;之后,含量均持续下降;另外,由于不同时期微生物活跃程度和根系生长影响根系分泌物扩散,造成不同时期根际土和非根际土中细胞分裂素总量不同.

#### 2.4 越橘根际土和非根际土中有机质含量变化

不同处理越橘根域土壤有机质含量测定结果如表2所示,施加氮肥的处理(k4),根际土壤各时期有机质平均质量分数最高,为7.26%,是单施秸秆处理(k3)的114.3%,是单施草炭处理(k2)的108.0%,是园田土(k1)的325.6%,说明土壤中加入秸秆、草炭等有机物料显著增加了土壤有机质,而且施加氮肥有利于土壤有机质的积累.非根际土壤中,k2处理的有机质含量最高,主要是该区域分布较多的草炭对增加土壤有机质有明显的效果.

表2 不同时期不同处理的越橘根域土壤有机质含量变化<sup>1)</sup>

Tab.2 Changes of different treatments on organic matter contents in *Vaccinium vitis-idaea* rhizosphere soil

处理 <sup>2)</sup>	根域 土壤	w(有机质)/%					
		萌芽期	新梢旺长期	新梢停长期	果实成熟期	落叶期	平均值
k1	根际土	1.89abA	2.16bA	2.22abA	2.48abA	2.39abA	2.23abA
	非根际土	1.68aA	1.82aA	1.74aA	1.87aA	1.92aA	1.81aA
k2	根际土	6.11dB	6.43dC	7.18dC	6.90dD	6.96dC	6.72dC
	非根际土	5.73cB	5.82cB	6.08cB	6.15cC	6.27cB	6.01cB
k3	根际土	5.86cB	6.67dC	6.35cdB	6.15cC	6.72bB	6.35cdB
	非根际土	4.56bB	5.44cB	5.21bB	5.05bB	5.75bB	5.20bB
k4	根际土	6.86eC	7.19eD	7.78eC	7.36eD	7.40eC	7.26eD
	非根际土	5.28bcB	5.83cB	6.35cdB	6.06cC	6.28cB	5.92cB

1)同列中,相同处理的数据后面凡具有相同大写或小写英文字母者,分别表示0.01水平或0.05水平上差异不显著(新复极差法).2)k1:园田土+硫磺粉;k2:园田土+硫磺粉+草炭;k3:园田土+硫磺粉+玉米秸秆;k4:园田土+硫磺粉+玉米秸秆+氮肥.

### 3 讨论与结论

#### 3.1 不同根域处理对越橘根系分泌物含量的影响

土壤有机质是制约土壤微生物种类与数量的因素,而微生物是土壤中植物激素的来源之一<sup>[8]</sup>,有机质丰富的土壤中细菌与真菌等微生物是土壤中生理活性物质的重要合成源<sup>[9]</sup>.从本试验来看,在整个年周期内,不同根域处理根际土中细胞分裂素平均含量以玉米秸秆配施氮肥处理(k4)含量最高,其他依次是单施秸秆、单施草炭及园田土的处理.玉米秸秆配施氮肥处理的细胞分裂素含量最高,主要是由于N肥促进了微生物对秸秆的腐解,有利于土壤有机质的积累,这与劳秀荣等<sup>[10]</sup>的研究结果一致,她认为N肥对提高土壤有机质有一定的作用.因为试验中加入秸秆和草炭的处理根系细胞分裂素含量显著高于园田土处理( $P < 0.01$ ),说明有机物料加入土壤后对土壤有机质增加效果明显,提高了土壤中根系分泌细胞分裂素的含量,这与姚胜蕊等<sup>[4]</sup>在盆栽苹果上的研究结果一致,他认为施用有机物料可以提高土壤中细胞分裂素(以ZR为主)的含量.比较加入

相同量的秸秆和草炭的处理,加入秸秆的处理根际土壤有机质含量(6.35%)低于加入草炭(6.72%)的处理,而根域土壤细胞分裂素含量则是单施秸秆处理高于单施草炭处理,推测其原因可能是由于单施秸秆处理的秸秆C/N高,其腐化过程缺少N肥,同时草炭是许多沼泽植物残体经过长期的泥炭化形成,本身积累了许多有害物质,不利于土壤微生物的活动,使根系分泌物、脱落物相应减少.具体原因有待进一步探讨.

#### 3.2 不同物候期与越橘根系分泌物的关系

从试验结果来看,越橘树体根系细胞分裂素含量的周年变化趋势与越橘树体的生理代谢活动大体一致.早春时期,随着温度升高,树体内的贮存营养物质开始转化利用,根系活动逐渐增强,细胞分裂素含量呈上升趋势;秋末季节,随着温度下降,树体生理活动下降并逐渐转向休眠,根系生长活动减弱,细胞分裂素含量呈下降趋势;而从早春到秋末期间,由于果树各种物候期相继或交错发生,树体内生理代谢变化复杂,故根系分泌物变化颇多,不尽相同.植物根系分泌有机物质是一种自然生理现象,其分泌

量受植物体内部和外部诸条件,如能量、营养状况、机械阻力、通气状况、根际 pH 和微生物等的影响<sup>[11]</sup>。细胞分裂素作为一种重要的内源激素,其主要是在根系合成,然后运输至地上部促进细胞分裂、枝叶生长和花芽分化等<sup>[12]</sup>。在生长盛期(6—7 月份),越橘根际土中细胞分裂素分泌物保持高含量水平与该时期越橘树体生长旺盛及根系合成和分泌能力强有关。另外,关于越橘根系分泌物受外部条件影响的理论意义和实用价值还有待进一步研究。

### 3.3 越橘根际与非根际细胞分裂素含量的差异

植物根系和根际微生物共存于土壤介质中,是相互作用,相互影响的。一方面,根系分泌物为微生物生长繁殖提供了碳源和能源,有利于微生物的生长发育。另一方面,根际微生物的活动和代谢作用,又影响植物根系营养物质的吸收和根系分泌物的释放<sup>[13-15]</sup>。本试验中从根际土和非根际土中细胞分裂素含量和变化来看,在生长盛期,随着根际土中细胞分裂素含量的明显增加,非根际土中细胞分裂素含量也迅速上升,甚至略高于根际土中细胞分裂素含量,可见非根际土中细胞分裂素并不是只来自于根际土,可能还有其另一重要来源,即在生长盛期,非根际土中微生物活动旺盛,通过其生理代谢产生大量细胞分裂素分泌到根际土中积累,从而引起根际土中细胞分裂素含量明显增加,这与姚胜蕊等<sup>[4]</sup>在苹果上的研究结果一致。另外,非根际土中细胞分裂素含量的明显降低也可能与根际土中酶的转化及与矿质营养元素配合、络合或螯合消耗有关<sup>[16-18]</sup>。越橘树体根际土紧贴根系表面,其内含根系分泌物的周年变化同根系生长发育规律大体一致,故可以比较真实地反映越橘树体根系分泌物的年变化规律。非根际土虽与根际土相距不远,但由于受根系作用和微生物活动等许多因素的影响,其内含根系分泌物含量低,而且周年变化也较复杂,与越橘树体根系分泌物的年变化规律有很大差异。

### 3.4 结论

不同根域处理对越橘根系细胞分裂素含量有显著影响,在年生长周期内,越橘根域土壤中细胞分裂素平均含量从高到低的顺序依次为玉米秸秆配施氮肥、单施秸秆、单施草炭和单纯园田土的处理;越橘细胞分裂素含量年变化规律表现为早春时期呈上升趋势,秋末季节呈下降趋势,而在早春至秋末之间,细胞分裂素含量较高,组分较多,同时变化较复杂。

### 参考文献:

[1] 李亚东,郭修武,张冰冰.浆果栽培学[M].北京:中国

农业出版社,2012:125-127.

- [2] 唐雪东,李亚东,张志东,等.不同土壤条件下根系活力和菌根侵染率比较研究[J].吉林农业大学学报,2005,27(1):43-47.
- [3] 陆景陵.植物营养学[M].北京:中国农业大学出版社,1994:109.
- [4] 姚胜蕊,李秀菊,董淑富,等.有机物对盆栽苹果土壤中细胞分裂素含量的影响[J].植物生理学通讯,1999,35(2):120-122.
- [5] 甄文超,王晓燕,孔俊英.草莓根系分泌物和腐解物中的酚酸类物质及其化感作用[J].河北农业大学学报,2004,27(4):75-78.
- [6] 卢颖林,董彩霞,董园园,等.高压液相色谱法同时测定植物组织中六种细胞分裂素组分和生长素[J].植物营养与肥料学报,2007,13(1):129-135.
- [7] 吴耕西,陈美霞,付雷,等.高效液相色谱法分析苹果新根中的细胞分裂素[J].山东农业大学学报,1996,27(3):341-345.
- [8] 张成娥,王栓全.作物秸秆腐解过程中土壤微生物量的研究[J].水土保持学报,2000,14(3):96-99.
- [9] 李秀菊,董淑富,刘用生,等.施用不同有机肥的盆栽苹果土壤中生长素及细胞分离素含量分析[J].植物生理学通讯,1998,34(3):183-185.
- [10] 劳秀荣,吴子叫,高燕春.长期秸秆还田改土培肥效应的研究[J].农业工程学报,2002,18(2):49-52.
- [11] 张福锁,曹一平.根际动态过程与植物营养[J].土壤学报,1992,29(3):239-250.
- [12] 束怀瑞.果树栽培生理学[M].北京:农业出版社,1993:296-297.
- [13] 朱丽霞,章家恩,刘文高.根系分泌物与根际微生物相互作用研究综述[J].生态环境,2003,12(1):102.
- [14] 刘子雄,朱天辉,张建.林木根系分泌物与根际微生物研究进展[J].世界林业研究,2005,18(6):25-30.
- [15] 倪志华,李晶,廖娇,等.果树根际微生态研究现状及展望[J].中国农业科技导报,2010,12(4):34-38.
- [16] COREY D B, AMANDA K B, DANIEL K M, et al. Root exudates regulate soil fungal community composition and diversity[J]. Appl Environ Microbiol, 2008, 74(3): 738-744.
- [17] YANG Chinghong, DAVID E. CROWLEY. Rhizosphere microbial community structure in relation to root location and plant iron nutritional status[J]. Appl Environ Microbiol, 2000, 66(1): 345-351.
- [18] FIORETTO A, PAPA S, SORRENTINO G, et al. Decomposition of *Cistus incanus* leaf litter in a Mediterranean maquis ecosystem: Mass loss, microbial enzyme activities and nutrient changes[J]. Soil Biol Biochem, 2001, 33(3): 311-321.

【责任编辑 李晓卉】