

水稻苗期生长特性对不同浓度 IAA 的响应

宁倩^{1,2}, 吴金水², 李宝珍², 吴蔓莉¹

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 中科院亚热带农业生态过程重点实验室, 湖南 长沙 410125)

摘要: 采用水培实验, 在水稻苗期研究外源添加不同浓度生长素(3-吲哚乙酸, IAA)对水稻根系(根长、根重)、地上部(株高、地上部重量)生长和叶绿素含量的影响。结果表明, 不同浓度 IAA 处理水稻 1d-5d, 对水稻苗期的生长无明显影响。处理时间延长至 10d, 1 μ M IAA 处理水稻根长显著增加($p < 0.05$), 增加了 41.1%, 对株高、根重和地上部重量无明显影响。随 IAA 浓度的升高, 对其影响表现出一定的差异。与对照相比, 10 μ M、25 μ M 和 100 μ M IAA 处理根重显著增加($p < 0.05$), 分别增加了 39.1%、25.9% 和 17.8%; 25 μ M-100 μ M IAA 处理使株高和地上部重量显著降低, 降幅分别在 16.0%-20.7% 和 20.0%-36.7% 之间, 导致其根冠比随 IAA 浓度增加而增大。与对照相比, 外源施加 IAA(1 μ M-75 μ M)处理使水稻叶绿素 a、b 和总含量均显著增加($p < 0.05$), 增幅均在 30% 以上, 以 10 μ M 对叶绿素含量的影响最大。因此, 外源施加适宜浓度的 IAA 可以促进水稻的生长和叶绿素含量的提高, 促进植物光合效率, 提高水稻产量。

关键词: IAA; 水稻; 根; 地上部; 叶绿素

中图分类号: S511

文献标识码: B

文章编号: 1000-0275(2013)02-0235-04

Response of Growth Characteristics to Different IAA Concentrations in Rice Seedling

NING Qian^{1,2}, WU Jin-shui², LI Bao-zhen², WU Man-li¹

(1. School of Environment and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi, 710055, China; 2. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha, Hunan 410125, China)

Abstract: A hydroponic experiment was conducted to study the effects of the exogenous auxin (3-indole acetic acid, IAA) on rice roots (root length, root weight), shoot growth (height and biomass) and chlorophyll content in the rice seedling stage. The results showed that the root growth in rice seedling was no significant difference when treated with different concentrations of IAA from 1d to 5d. When treated for 10d, root length of rice for the treatment of 1 μ M IAA increased by 41.1% ($p < 0.05$), while plant height, root and shoot weights were not significantly affected; root weight for the treatments of 10 μ M, 25 μ M and 100 μ M IAA increased by 39.1%, 25.9% and 17.8% ($p < 0.05$), respectively; plant heights and shoot weights reduced significantly from a rate of 16.0% to 20.7%, and from 20.0% to 36.7% with increasing IAA concentration from 25 μ M to 100 μ M IAA, respectively, as compared with CK. As a result, the ratios of root to shoot increased with IAA concentration increases. Moreover, contents of chlorophyll a, b and total chlorophyll for treatments with IAA (1 μ M-75 μ M) increased by more than 30% ($p < 0.05$) compared with the control. Therefore, applying IAA with a suitable concentration in rice seedling stage can promote rice growth and increase chlorophyll content, which is beneficial to promote photosynthesis efficiency and improve rice yield.

Key words: Indole-3-acetic acid; rice; root; shoot; chlorophyll

植物内源激素作为信号物质, 参与并调控着植物生长的许多生理过程, 包括器官的形成与发育。到目前为止, 有五大类植物激素得到大家公认, 即生长素类、赤霉素类、细胞分裂素类、脱落酸。其中生长素集中分布在生长旺盛的茎尖和根尖, 叶片、胚、幼嫩的果实和种子等, 对细胞分裂、伸长和分化, 营养器官和生殖器官的生长、成熟和衰老的调控等方面都具有非常重要的作用^[1]。

3-吲哚乙酸(Indole-3-acetic acid, IAA)是最早发现的一类生长素。研究表明, 外源添加 IAA 可促进大豆质子分泌, 使细胞壁松弛, 延长快, 从而影响伸长生长^[2], 还可促使农产品产量增加 5%-30%^[3]。烟草经 IAA 处理, 可促进烟草根系的发育, 增加根重, 提高根系活力, 增强根系的代谢能力^[4]。Chen^[5]证明了 0.3 μ mol/L 的 IAA 能够促进烟草 BY-2 细胞的伸长,

对细胞分裂并无影响, 在相对较高的 IAA 浓度下, 细胞分裂加快, 而细胞的伸长却受到抑制。秦铁伟等^[6]研究表明, 外源喷施 30mg/kg 和 60mg/kg 的 IAA 使烟叶上部叶开片情况最好, 而 45mg/kg 处理的烟叶产量和产值最高。生长素对根系生长的作用是浓度依赖型的, 低浓度促进根系生长, 超过一定浓度则表现为对根系生长的抑制^[7]。赵东利等^[8,9]研究表明喷施低浓度(低于 1 μ mol/L)能促进根系生长, 1 $\times 10^{-3}$ μ mol/L 的 IAA 能显著增加大蒜生根数量及根质量, 1 $\times 10^{-2}$ μ mol/L 的 IAA 能促进月季枝条生根率, 而高浓度(高于 10 μ mol/L)则抑制大蒜和月季根生长。且外源加入 IAA 对人参毛状根的生长、形态和次生代谢物的合成等产生影响^[10]。虽然 IAA 作为植物生长调节剂已被应用于烟草、果蔬等作物, 以提高作物产量为主要目的, 但 IAA 在调控粮食作物如水稻生长的适

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 41001180); 十二·五国家科技支撑计划项目(编号: 2012BAD14B178)。

作者简介: 宁倩(1986-), 女, 陕西西安人, 硕士研究生, 主要从事土壤与环境生态方面的研究; 通讯作者: 李宝珍(1977-), 女, 博士, 副研究员, 主要从事农业资源利用与植物营养分子生物学的研究。

收稿日期: 2012-10-26, **修回日期:** 2013-01-30

宜浓度、光合特性及对养分利用的影响研究尚不多见。因此,本实验采用水培方法,研究不同浓度 IAA 对苗期水稻株高、根系及叶绿素含量的影响,以探讨促进水稻生长和光合作用的最佳浓度,为农业生产中合理施用 IAA 提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

水稻为陵两优 211 杂交水稻,购自湖南省农科院种子分公司。IAA 购自长沙中津生物科技有限公司。营养液大量元素浓度: NH_4NO_3 为 1.25mmol/L, KH_2PO_4 为 0.3mmol/L, K_2SO_4 为 0.35mmol/L, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 为 125mmol/L, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 为 1mmol/L, 微量元素浓度: H_3BO_4 为 36.7 $\mu\text{mol/L}$, MnCl_2 为 9.1 $\mu\text{mol/L}$, ZnSO_4 为 0.77 $\mu\text{mol/L}$, CuSO_4 为 0.32 $\mu\text{mol/L}$, H_2MoO_4 为 0.39 $\mu\text{mol/L}$, EDTA-Fe 为 20.0 $\mu\text{mol/L}$, Na_2SiO_4 为 2 mmol/L, 相当于 SiO_2 浓度 120 mg/kg, pH 调节至 5.8~6.0。

1.2 试验方法与处理

为找到促进水稻生长的最适 IAA 浓度,本文采用水培方法,设 6 个 IAA 浓度梯度,即 1 μM 、10 μM 、25 μM 、50 μM 、75 μM 、100 μM ,以不添加 IAA(CK)为对照,共 7 个处理。水稻种子经 15% H_2O_2 消毒 20min,用去离子水冲洗干净后在 30℃ 的暗培养箱中培养 2d,出芽后将其平铺在有网眼的塑料筐中生长。取苗龄 6d 且生长均匀的健壮幼苗移栽于事先装有 700ml 完全营养液的不透光塑料杯(高 190mm、直径 95mm)中进行不同浓度 IAA 处理,每杯 4 穴,每穴 3 株。2d~3d 换一次营养液,3 次重复,随机排列。在光照培养箱中进行,光照周期 16h/8h(昼/夜),温度控制在 28℃/18℃(昼/夜)。

1.3 样品采集与测定

水稻处理 1d、5d、10d 后取样,测量株高、根长、地上部重、根重;第 10d 后,保存部分鲜样于 -4℃ 冰箱中,进行叶绿

素含量的测定;部分干样于烘箱中经 105℃ 杀青 0.5 h,再于 70℃ 中烘干 24h 至恒重,称重。叶绿素采用乙醇提取测定^[1]。计算公式: $C_a=13.95A_{665}-6.88A_{649}$; $C_b=24.96A_{649}-7.32A_{665}$, 式中 C_a 和 C_b 分别为叶绿素 a 和 b 的浓度,单位为 mg/L,叶绿素含量(mg/g)=(C × V)/(W × 1000),式中 C 即($C_a + C_b$)为叶绿素总浓度(mg/L),V 为提取液总体积(ml),W 为叶片鲜重(g)。

1.4 数据处理

采用 Excel 2003 和 SPSS 13.0 进行数据处理和统计分析,文中各表均表示 3 次重复试验的平均值和标准误差,差异显著性检验选用 LSD 法,比较不同处理间在 $p < 0.05$ 水平的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同浓度 IAA 对水稻根长和根重的影响

不同浓度 IAA 处理水稻 1d 和 5d 后,根系的变幅分别为 5.56cm~5.97cm 和 5.25cm~5.56 cm 之间,与对照 CK 相比,均没有显著变化(表 1)。IAA 处理 10d 后,与 CK 相比,1 μM IAA 处理促进了水稻根系的生长,根长显著增加($p < 0.05$),增加了 41.1%,但 IAA 处理浓度为 10 μM ~100 μM 之间时,对苗期水稻根系无明显影响。

IAA 处理对苗期水稻根重的影响与根长存在一定的差异。与 CK 相比,不同浓度 IAA 处理 1d 后,根重没有明显差异。IAA 处理 5d 后,除 1 μM IAA 处理的根重与 CK 无明显差异外,10 μM ~100 μM IAA 处理的水稻,根重显著增加($p < 0.05$),增幅为 21.2%~46.2%,以 100 μM IAA 处理的根重增加最大,次之为 50 μM IAA 处理(表 1)。随 IAA 处理时间的延长,10d 后 IAA 处理与 CK 相比,水稻根重亦有不同程度的增加,且 10 μM 、25 μM 和 100 μM IAA 处理的水稻根重显著增加,分别增加了 39.1%、25.9%和 17.8%。

表 1 不同浓度 IAA 处理对水稻根长和根重的影响

浓度 (μM)	平均根长(cm)			平均根重(g/plant)		
	1d	5d	10d	1d	5d	10d
0	5.525 ± 0.544a	5.567 ± 0.131a	5.683 ± 0.097b	0.048 ± 0.002a	0.043 ± 0.001c	0.164 ± 0.007d
1	5.842 ± 0.291a	5.583 ± 0.222a	8.022 ± 0.440a	0.044 ± 0.002a	0.045 ± 0.001c	0.177 ± 0.006cd
10	5.917 ± 0.204a	5.742 ± 0.184a	5.996 ± 0.546b	0.047 ± 0.002a	0.053 ± 0.002b	0.228 ± 0.010a
25	5.558 ± 0.494a	5.675 ± 0.286a	5.758 ± 0.153b	0.047 ± 0.001a	0.057 ± 0.002b	0.207 ± 0.004ab
50	5.967 ± 0.353a	5.558 ± 0.181a	5.617 ± 0.368b	0.045 ± 0.002a	0.058 ± 0.002ab	0.182 ± 0.015bcd
75	5.717 ± 0.195a	5.250 ± 0.258a	5.658 ± 0.237b	0.045 ± 0.001a	0.056 ± 0.003b	0.159 ± 0.010d
100	5.667 ± 0.256a	5.583 ± 0.168a	5.933 ± 0.394b	0.043 ± 0.000a	0.063 ± 0.003a	0.193 ± 0.006bc

注:不同字母表示不同 IAA 浓度处理间差异显著($p < 0.05$),相同浓度表示差异不显著,下同。

2.2 不同浓度 IAA 对水稻株高和地上部重量的影响

不同浓度 IAA 处理水稻 1d 和 5d 后,苗期水稻株高的变幅分别为 18.18cm~19.72cm 和 20.60cm~21.62cm 之间,与对照 CK 相比,均没有显著变化(表 2)。随处理时间延长,到 10d 后,与 CK 相比,1 μM IAA 处理的水稻株高增加了 5.0%,但未达到显著性差异。随 IAA 浓度的增加达 10 μM 后,水稻的生长被抑制,其株高开始下降。与 CK 相比,除 10 μM 处理外,其他处理均显著降低($p < 0.05$),水稻株高的降幅在 16.0%~20.7%之间,但它们之间未达到显著性水平。

不同浓度 IAA 处理水稻 1d 和 5d 后,除 50 μM IAA 处理 5d,地上部重量与 CK 比较显著增加(增长了 20.2%, $p < 0.05$)

外,其他处理均对地上部重量无明显影响。到处理 10d,当 IAA 浓度超过 25 μM 后,水稻地上部的重量受到显著抑制,与 CK 相比显著下降,下降幅度为 20.0%~36.7%之间,以 75 μM 对生物量的降低幅度最大(表 2)。

不同浓度 IAA 处理水稻 1d 后,根冠比的变幅分别为 0.61~0.70 之间,与 CK 相比,没有显著影响(表 3)。IAA 处理 5d 后,与 CK 相比,25 μM 、75 μM 和 100 μM IAA 处理的根冠比显著增加($p < 0.05$),分别增加了 24.0%、21.1%和 29.5%。IAA 处理 10d 后,施加 IAA 处理根冠比逐渐升高,与 CK 相比,除 1 μM IAA 处理无明显增加外,10 μM ~100 μM IAA 显著增加($p < 0.05$),增幅为 45.1%~76.0%,以 100 μM 的根冠比

表2 不同浓度 IAA 处理对水稻株高和株重的影响

浓度 (μM)	平均株高(cm)			地上部平均重量(g/plant)		
	1d	5d	10d	1d	5d	10d
0	19.21 ± 0.349a	20.38 ± 0.718a	27.21 ± 0.756ab	0.073 ± 0.002a	0.095 ± 0.004b	0.416 ± 0.022a
1	19.72 ± 0.667a	21.13 ± 0.982a	28.54 ± 0.606a	0.073 ± 0.005a	0.106 ± 0.009ab	0.416 ± 0.032a
10	18.99 ± 0.476a	21.28 ± 0.656a	25.72 ± 0.530b	0.076 ± 0.003a	0.109 ± 0.008ab	0.397 ± 0.020a
25	18.98 ± 0.310a	20.98 ± 0.352a	22.79 ± 0.199c	0.067 ± 0.002a	0.100 ± 0.004ab	0.333 ± 0.012b
50	19.28 ± 0.350a	21.67 ± 0.432a	22.87 ± 0.658c	0.072 ± 0.002a	0.114 ± 0.004a	0.303 ± 0.025bc
75	18.18 ± 0.582a	20.60 ± 0.685a	21.58 ± 0.483c	0.067 ± 0.004a	0.101 ± 0.005ab	0.263 ± 0.018c
100	19.57 ± 0.688a	21.62 ± 0.313a	22.63 ± 0.330c	0.069 ± 0.002a	0.107 ± 0.003ab	0.280 ± 0.017bc

最大,25 μM 次之。

表3 不同浓度 IAA 处理的水稻根冠比

浓度 (μM)	根冠比		
	1d	5d	10d
0	0.663 ± 0.046a	0.458 ± 0.018de	0.397 ± 0.021c
1	0.613 ± 0.026a	0.432 ± 0.031e	0.431 ± 0.028c
10	0.618 ± 0.038a	0.487 ± 0.031cde	0.577 ± 0.015b
25	0.703 ± 0.038a	0.568 ± 0.027ab	0.624 ± 0.023ab
50	0.628 ± 0.024a	0.505 ± 0.016bcd	0.600 ± 0.021b
75	0.644 ± 0.045a	0.555 ± 0.018abc	0.605 ± 0.005b
100	0.616 ± 0.020a	0.593 ± 0.010a	0.699 ± 0.050a

2.3 不同浓度 IAA 对水稻叶绿素含量的影响

叶绿素含量高低是影响光合作用强度的主要因素之一。不同浓度 IAA 处理水稻 1d 后, 叶绿素 a 含量的变幅为 1.24mg/g-1.30mg/g, 与对照 CK 相比, 均没有显著影响(表 4)。IAA 处理水稻 5d 后, 与 CK 比较, 1 μM -100 μM IAA 处理的叶绿素 a 含量显著增加 ($p<0.05$), 增长了 34.4%-51.0%, 以 10 μM IAA 处理叶绿素 a 含量最高。到处理 10d 后, 叶绿素 a 含量与 CK 相比分别增加了 0.12mg/g-0.52mg/g, 除 100 μM IAA 处理无显著差异外, 1 μM -75 μM IAA 处理显著增加

($p<0.05$), 增加量由高到低为: 10 μM >25 μM >1 μM >50 μM >75 μM 。表明叶绿素含量增加, 光合作用相应加强, 利于作物生长。

不同浓度 IAA 处理水稻 1d 后, 叶绿素 b 含量的变幅为 0.38mg/g-0.40mg/g, 与对照 CK 相比, 均没有显著影响(表 4)。不同浓度 IAA 处理水稻 5d 后, 与 CK 比较, 叶绿素 b 含量显著增加 ($p<0.05$), 增幅为 35.5%-73.0%, 增幅顺序以 25 μM >10 μM >100 μM >50 μM >75 μM >1 μM 。随处理时间延长至 10d, 与 CK 相比, 1 μM -100 μM IAA 处理的水稻叶绿素 b 含量显著增加 ($p<0.05$), 增幅为 23.7%-64.0%, 以 10 μM IAA 处理的叶绿素 b 含量最高。

总叶绿素的含量由叶绿素 a 和 b 含量决定。与 CK 相比, 不同浓度 IAA 处理 1d 后, 总叶绿素含量没有明显差异。IAA 处理 5d 后, 与 CK 比较, 总叶绿素含量显著增加 ($p<0.05$), 增幅为 30.1%-55.5%, 增幅顺序以 10 μM >50 μM >25 μM >100 μM >75 μM >1 μM 。随 IAA 处理时间的延长, 10d 后 IAA 处理与 CK 相比, 除 100 μM IAA 处理的总叶绿素含量与 CK 无明显差异外, 1 μM -75 μM IAA 处理的总叶绿素含量均显著性增加 ($p<0.05$), 增幅为 14.4%-54.5%, 以 10 μM IAA 处理的增长最多, 次之为 25 μM IAA 处理(表 4)。

表4 不同浓度 IAA 处理对水稻叶绿素含量的影响

浓度 (μM)	叶绿素 a			叶绿素 b			叶绿素 C		
	1d	5d	10d	1d	5d	10d	1d	5d	10d
0	1.206 ± 0.037a	1.173 ± 0.034c	1.652 ± 0.043e	0.366 ± 0.008a	0.310 ± 0.006c	0.479 ± 0.008d	1.572 ± 0.043a	1.483 ± 0.040c	2.131 ± 0.050e
1	1.272 ± 0.022a	1.577 ± 0.033b	2.216 ± 0.101bc	0.392 ± 0.002a	0.420 ± 0.008b	0.656 ± 0.047c	1.664 ± 0.020a	1.929 ± 0.079b	2.872 ± 0.146bc
10	1.263 ± 0.027a	1.771 ± 0.064a	2.507 ± 0.149a	0.390 ± 0.006a	0.535 ± 0.018a	0.786 ± 0.046a	1.653 ± 0.030a	2.307 ± 0.083a	3.293 ± 0.194a
25	1.242 ± 0.020a	1.646 ± 0.042ab	2.415 ± 0.071ab	0.380 ± 0.006a	0.536 ± 0.040a	0.753 ± 0.024ab	1.622 ± 0.026a	2.182 ± 0.066ab	3.169 ± 0.095ab
50	1.251 ± 0.041a	1.672 ± 0.032ab	2.161 ± 0.044c	0.391 ± 0.010a	0.506 ± 0.011a	0.678 ± 0.011bc	1.642 ± 0.051a	2.295 ± 0.123a	2.839 ± 0.055c
75	1.282 ± 0.075a	1.591 ± 0.073b	2.037 ± 0.017cd	0.395 ± 0.023a	0.486 ± 0.021a	0.660 ± 0.011c	1.677 ± 0.098a	2.077 ± 0.094ab	2.697 ± 0.027cd
100	1.294 ± 0.038a	1.642 ± 0.069ab	1.846 ± 0.035de	0.396 ± 0.006a	0.523 ± 0.023a	0.593 ± 0.012c	1.689 ± 0.044a	2.165 ± 0.083ab	2.438 ± 0.047de

3 结论与讨论

3.1 结论

水稻苗期生长状况是决定水稻产量的重要因素。外源施用不同浓度 IAA 对水稻苗的生长、叶绿素含量的提高有重要的影响。1 μM -10 μM IAA 处理 10d, 促进水稻苗的生长, 特别是 1 μM IAA 处理使根长增加了 41.1% ($p<0.05$)。但随 IAA 浓度的升高, 其对水稻苗的生长产生抑制作用, 根长均显著降低, 根重增加, 株高和地上部生长量均显著降低。而且, 外源施加 IAA 处理可显著增加水稻叶绿素的含量, 以 10 μM IAA 处理效果最大。整体而言, 外源添加 1 μM IAA 处理水稻苗 10d 可促进水稻的生长和叶绿素含量的提高, 是培养水稻壮苗较适宜的浓度和时间。

3.2 讨论

生长素作为信号分子, 参与调节着植物生长发育的诸多过程, 如根系和茎的分化、伸长及衰老等^[2,12]。研究表明, 生长素通过调节其相关基因和 PIN (Protein Identification Number) 蛋白的表达水平, 而影响侧根的发生和伸长; 且生长素对根系生长的作用是浓度依赖型的, 低浓度促进根系生长, 超过一定浓度则表现为对根系生长的抑制^[7], 但不同作物对 IAA 浓度的敏感性不一致, 如 1nmol/L 生长素对于莴苣根系产生抑制作用, 但 1pmol/L 即表现出对超敏感的转基因拟南芥根系产生抑制作用^[13]。本研究的结果与前人的报道一致, 外源低浓度 IAA (1 μM) 处理增加了根长, 对根重影响不明显; 而高浓度 IAA (>10 μM) 处理则抑制根系的伸长但增加根重(表 1)。而且, 高浓度 IAA (>10 μM) 处理不仅对根系产生抑制作用, 对地上部的生长也有抑制作用。超过 10 μM IAA 浓度处理显著降低了水稻苗的株高和重量(表 2), 从而增大了根冠

比。可能的原因是外源施用生长素通过调节茎中活性赤霉素的水平而影响地上部的生长^[14,15]。研究表明,豌豆顶端合成的 IAA 向茎中运输受阻,抑制茎中赤霉素的合成,致使植株矮化^[15]。本研究中可能外源高浓度 IAA 的添加抑制顶端合成的 IAA 向茎和根系的运输,而影响赤霉素的合成。

叶绿素是光合作用的场所,其光合能力的大小直接与植物的生长量相关。本研究发现,外源 IAA 处理能显著增加水稻叶绿素含量,以 10 μ M 影响最大,但浓度越高,这种促进效应逐渐减弱,达 100 μ M 时已与对照无差异。这可能与生长素调控碳水化合物代谢相关。研究表明,GA3(Gibberellic acid3,赤霉素 3)和 IAA 处理的慈竹,叶绿素含量增加,其光合能力提高^[16]。陈爱国等^[17]在烟草的研究表明,IAA 处理对叶绿素含量没有明显的影响,但早打顶有利于 IAA 和赤霉素的积累,同时也增加可溶性糖的含量,且在烟草生长后期涂抹 IAA 也可抑制 ABA(abscisic acid,脱落酸)的合成,从而延长淀粉的合成时间。亦有研究表明,IAA 处理的烟草可促进叶绿体中光合产物的转化^[18]。本研究结果与在烟草上的研究有差异,可能是不同作物对生长素的敏感性不一样,而表现出对碳素代谢影响的差异。但生长素对碳代谢调控的作用机理研究相对较少,因此这方面的研究有待进一步深入探讨。

参考文献:

- [1] Novickienė L, Asakavičiūtė R. Analogues of auxin modifying growth and development of some monocot and dicot plants [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2006, 28(6): 509–515.
- [2] 吕剑,喻景权.植物生长素的作用机制[J].*植物生理学通讯*, 2004, 40(5): 624–628.
- [3] 何瑞,刘艾平,曹玉广.植物生长调节剂使用中的安全问题[J].*中国卫生监督杂志*, 2003, 10(2): 99–101.
- [4] 洪丽芳,苏帆,付立波,等.生长素在烤烟库源关系改变时对根系呼吸作用生理指标的影响[J].*中国农业科学*, 2003, 36(12): 1604–1608.
- [5] Chen J G. Dual auxin signaling pathways control cell elongation and division[J]. *Plant Growth Regulation*, 2001, 20(3): 255–264.
- [6] 秦铁伟,刘兰明,黎全胜,等.吲哚乙酸对烤烟生长、产值及烟碱含量的影响[J].*湖北农业科学*, 2010, 10(3): 2459–2461.
- [7] Woodward A W, Bartel B. Auxin: regulation, action, and interaction[J]. *Annals of Botany*, 2005, 95(5): 707–735.
- [8] 赵东利,冯冠军,蒋龙,等.吲哚乙酸(IAA)对大蒜根生长发育的影响[J].*大连大学学报*, 2008, 12(3): 89–91.
- [9] 赵东利,潘宇虹,冯冠军,等.吲哚乙酸(IAA)诱导月季枝条生根研究[J].*大连大学学报*, 2009, 12(3): 85–86.
- [10] Washida D, Shimomura K, Takido M, et al. Auxins affected ginsenoside production and growth of hairy roots in panax hybrid[J]. *Biological Pharmaceutical Bulletin*, 2004, 27(5): 657–660.
- [11] 李合生.植物生理生化试验原理和技术[M].北京:高等教育出版社, 1995: 195–197.
- [12] 王冰,李家洋,王永红.生长素调控植物株型形成的研究进展[J].*植物学通报*, 2006, 23(5): 443–458.
- [13] Kim SH, Arnold D, Lloyd A, et al. Antisense expression of an Arabidopsis ran binding protein renders transgenic roots hypersensitive to auxin and alters auxin-induced root growth and development by arresting mitotic progress[J]. *The Plant Cell*, 2001, 13(12): 2619–2630.
- [14] 尹昌喜,汪献芳,曾汉来,等.生长素对植物茎伸长的调控作用[J].*植物生理学通讯*, 2009, 45(7): 503–508.
- [15] Ross J J. Effects of auxin transport inhibitors on gibberellins in pea[J]. *Plant Growth Regulation*, 1998, 17(3): 141–146.
- [16] 胡尚连,贾举庆,曹颖,等. GA3 和 IAA 对慈竹纤维和叶绿素含量动态积累的调控效应[J].*植物研究*, 2008, 28(6): 737–740.
- [17] 陈爱国,王树声,申国明,等.打顶时间与外源生长素对烟叶成熟衰老及产质量的影响[J].*中国烟草科学* 2006, 27(4): 27–30.
- [18] 许自成,张婷,卢秀萍,等.打顶后施用生长素(IAA)和钾肥对烤烟碳氮代谢的影响[J].*生态学杂志*, 2007, 26(4): 461–465.