

张继旭, 申国明, 孔凡玉, 等. 四环素对烤烟生长发育及光合作用的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(1): 48-56.

ZHANG Ji-xu, SHEN Guo-ming, KONG Fan-yu, et al. Effect of tetracycline on the growth and photosynthesis of flue-cured tobacco[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(1): 48-56.

四环素对烤烟生长发育及光合作用的影响研究

张继旭^{1,2}, 申国明¹, 孔凡玉¹, 张忠锋¹, 王 瑞³, 高 林¹, 戴衍晨¹, 郑加玉¹,
张继光^{1*}

(1. 中国农业科学院烟草研究所, 山东 青岛 266101; 2. 青岛农业大学农学与植物保护学院, 山东 青岛 266109; 3. 湖北省烟草公司恩施州分公司, 湖北 恩施 445000)

摘 要:为明确典型抗生素残留对烟草的生态毒理效应, 采用盆栽试验系统研究了不同剂量四环素添加对烤烟生长发育及光合作用的影响。结果表明: 在烟草生长发育过程中, 低量四环素添加($5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)能促进烟草株高增加, 中高量的四环素添加($50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 及 $500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)对株高具有明显抑制作用, 但促进了茎围和叶片数的增加。此外, 低量四环素对烟草根长及根体积有一定促进作用, 高量则产生抑制作用, 且抑制作用随生育进程而逐渐减弱, 至生育后期已无明显影响。四环素添加各处理的烟草根冠比总体上均低于对照(团棵期除外), 且根冠比随四环素添加量的增加而降低。四环素对烟草净光合速率、气孔导度和蒸腾速率的影响, 随生育进程呈现前期抑制后期促进的趋势, 对胞间 CO_2 浓度的影响则无明显规律性。该研究显示, 四环素可能通过影响烟草光合作用而对烟草生长发育产生重要作用, 同时烟草通过调控根系发育及根冠比来适应四环素的影响。因此, 中高量的四环素添加对烟草生长发育及光合作用具有一定的生态毒性效应, 但毒性效应随着烟草生育进程而减弱。

关键词:烟草; 四环素; 生长发育; 根冠比; 光合作用

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2017)01-0048-09 doi:10.11654/jaes.2016-0662

Effect of tetracycline on the growth and photosynthesis of flue-cured tobacco

ZHANG Ji-xu^{1,2}, SHEN Guo-ming¹, KONG Fan-yu¹, ZHANG Zhong-feng¹, WANG Rui³, GAO Lin¹, DAI Yan-chen¹, ZHENG Jia-yu¹, ZHANG Ji-guang^{1*}

(1. Tobacco Research Institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Qingdao 266101, China; 2. Qingdao Agricultural University, College of Agronomy and Plant Protection, Qingdao 266109, China; 3. Enshi Branch of Hubei Tobacco Company, Enshi 445000, China)

Abstract: In order to evaluate the eco-toxicological effects of typical antibiotics residue on tobacco, the effects of tetracycline addition on tobacco growth and photosynthesis were studied via pot experiments. The results showed that during the whole growth period of tobacco, the low amount of tetracycline addition ($5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) could increase the tobacco height. The middle and high amount of tetracycline addition ($50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) had an obvious inhibitory effect on tobacco height, but they promoted the increase of stem circumference and leaf number of tobacco. Furthermore, the low amount of tetracycline addition could promote root length and root volume of tobacco, while the high amount of tetracycline addition inhibited tobacco root growth, and the suppression gradually decreased with the growth stages, with no significant difference on the late growth stage. The root to shoot ratio of tobacco in the tetracycline addition treatments were lower than that in CK during the whole growth period except for the resetting stage, and it decreased with the increase of the amount of tetracycline addition. Tetracycline addition first inhibited then enhanced the photosynthetic rate, stomatal conductance and transpiration rate during the tobacco

收稿日期: 2016-05-12

作者简介: 张继旭(1988—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为烟草栽培与烟叶质量安全。E-mail: zhangjixu2088@126.com

* 通信作者: 张继光 E-mail: zhangjiguang@caas.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(41201291); 中国农业科学院科技创新工程项目(ASTIP-TRIC06); 中国烟草总公司科技重点项目(110201202014) Project Supported: The National Natural Science Foundation of China(41201291); The Agricultural Science & Technology Innovation Program(ASTIP-TRIC06); The Key Project of Science & Technology of CNTC(110201202014)

growth period, but its effect on intercellular CO_2 concentration had no obvious regularity. These results indicated that tetracycline might have a potential impact on tobacco growth through influencing photosynthesis. Meanwhile, tobacco could adapt the effect of tetracycline by regulating root development and the root to shoot ratio. Therefore, the effects of middle and high amount of tetracycline addition on tobacco growth and photosynthesis showed a certain eco-toxicity, which decreased with the growth stages of tobacco. The specific mechanism of tetracycline on tobacco growth and its risk assessment in tobacco field need to be further studied.

Keywords: tobacco; tetracycline; growth; root to shoot ratio; photosynthesis

四环素类抗生素作为人畜共用的广谱性抗生素,在世界范围内用量巨大,尤其作为禽畜疾病预防和生长促进剂而被大量使用^[1]。禽畜饲喂的四环素类药物大部分以原药或尚有活性的代谢物排出^[2-3],并随禽畜粪便进入环境,然后通过直接或间接的途径(有机类肥料施用或灌溉水等)进入土壤环境,从而造成土壤抗生素的残留污染^[4]。目前在禽畜粪便及农田土壤中均检测到四环素的残留。国彬等^[5]对广东典型养殖场的研究发现,猪粪及鸡粪中抗生素含量最高的均为四环素类,分别达到 123.76 、 $14.59 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。而在不同地点及不同利用方式的农田土壤中四环素残留量差异较大,可在 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 级至 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 级之间变化^[6-8]。Warman 和 Thomas^[9]在用鸡粪施肥的土壤中发现,氯四环素的含量水平已经接近其他农药类有机污染物的水平。土壤中的抗生素残留会被植物吸收并富集,一方面会影响植物本身的生长发育及其生理代谢,另一方面通过食物链途径可对人类及其他生物产生潜在的风险或危害^[10]。

虽然农田土壤环境质量标准中尚没有抗生素的污染指标,但四环素类抗生素的环境行为及对作物生长发育的影响目前受到广泛关注。作物组织中的四环素类抗生素浓度一般随土壤中浓度的增加而增加,但不同作物对抗生素的富集能力存在品种间差异^[11]。同时抗生素对作物生长的抑制作用也存在品种及部位间的差异,一般对根生长的抑制作用大于叶或芽,且抑制作用随着抗生素浓度而增加^[5,12],因而抗生素对作物生长发育的抑制作用具有较好的剂量-效应关系^[5,13]。此外,四环素类抗生素通过影响植物的生理生态过程而影响作物发育。在抗生素初始污染胁迫下,作物的应激蛋白、谷胱甘肽 S-转移酶和过氧化物酶活性明显增加,表现出一定的应激反应^[14]。但随着抗生素暴露时间及剂量增加,作物体内的抗氧化系统受到破坏,抗生素对作物生长发育表现出生态毒性作用^[13],如较高浓度的四环素通过抑制植原体及相关抗氧化酶活性而抑制作物的幼芽分支及其发育^[15]。也有研究发现,四环素类抗生素通过抑制叶绿体的翻译

活性及叶绿素合成酶的活性而对作物生长产生毒性作用^[16]。因此,抗生素对植物生长发育的影响及机制取决于抗生素类型、剂量及植物种类等多种因素^[17-18]。

烟草作为我国重要的经济作物之一,在我国中南及西南地区广泛种植。在烟草栽培过程中通常大量施用有机类肥料,其中畜禽粪便类农家肥及以此为原料制作的商品有机肥的施用,易导致土壤的抗生素残留污染及其对烟草的生态毒性。近年来,关于四环素类抗生素对作物种子萌发及幼苗生长的研究较多^[17,19-20],但四环素残留对整个生育期内作物生长发育及生理过程的研究还鲜见报道。为此,本文以典型的广谱性抗生素——四环素为研究对象,采用盆栽试验,模拟不同浓度四环素添加对整个生育期内烟草生长发育和光合作用的影响,以明确四环素残留对烟草的生态毒理效应,为后续四环素类抗生素的环境风险评估及烟田应用管理提供重要的科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2014 年在湖北恩施“清江源”现代烟草农业科技园区温室中进行。

供试土壤采自当地白果乡茅坝槽烟田周边的林地,土壤类型为黄棕壤,土样采集后经自然风干,剔除根系等杂物,碾碎过 2 mm 筛后备用。土壤的基本理化性质为:pH 6.9,有机质 $19.23 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮 $85.37 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷 $62.70 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $218.67 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,四环素残留未检出。

试验用烤烟品种为云烟 87,来自玉溪中烟种子有限责任公司。试验用四环素盐酸盐(纯度 97.5%)来源于中国药品生物检定所。

1.2 试验设计与方法

1.2.1 试验设计

盆栽试验设置 1 个对照和 3 个不同质量分数的四环素添加处理,分别为:四环素添加量为 $0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干土(CK);四环素添加量为 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干土(ST1);四环素添加量为 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干土(ST2);四环素添加量

为 $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干土(ST3)。每个处理设 18 次重复(18 盆)。

1.2.2 试验方法

盆栽试验所用土壤经自然风干过筛后,在塑料膜上与所施肥料充分混匀后装盆,在盆底加入少量石砾等排水填充物,每盆装风干土 15 kg,然后灌以足够水分使土壤沉实。每盆移栽生长一致的健康无病烟苗 1 株。待移栽的烟苗还苗后,将各处理需添加的四环素溶于蒸馏水中,一次性均匀浇于各盆中,对照处理浇等量的蒸馏水。试验期间每隔 3~5 d 称重补水,使土壤含水量保持在 60%最大田间持水量的水平。

1.3 样品检测与分析

1.3.1 土壤理化性质及四环素含量测定

采用鲁如坤^[24]的方法测定试前土壤的 pH、有机质、碱解氮、有效磷、速效钾等理化性质。采用 HPLC-MS/MS 方法测定土壤中的四环素含量^[22],该方法中四环素的检测限为 $1.10 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,定量限为 $6.50 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,四环素的回收率(加标量 $200 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)为 78.5%,相对标准偏差为 4.8%。

1.3.2 烟草农艺性状调查

烟苗移栽后每处理确定 5 盆烟株,参照行业标准 YC/T 142—2010^[23],分别在烟草的团棵期和现蕾期定株观察烟草的株高、茎围、叶长、叶宽及叶片数等植物学性状。

1.3.3 烟草根系发育及各部位生物量测定

在烟草的团棵期、旺长期、现蕾期、平顶期和成熟期(移栽后第 30、55、80、105、130 d),每个处理分别取有代表性的烟草 3 株,采取破坏性取样方法将根系完整取出,用自来水冲洗干净后,观测根系发育状况,用截线法分别测定主根、一级侧根及二级侧根根长,然后用排水法测量根系的体积。在根系取样测定的同时,按照根、茎、叶三个部位分别取样,所取样品均在 105°C 杀青 30 min,然后在 70°C 烘干至恒重,测量并

计算各部位的生物量。

1.3.4 烟草光合作用测定

在烟草不同生育期(团棵期、旺长期、现蕾期、平顶期和成熟期),用 LI-6400(LI-COR, Gene Company Limited)便携式光合仪在 25°C 、 $1200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 红蓝光源、开放环境下测定各处理植株中部叶的净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、胞间 CO_2 浓度(Ci)和蒸腾速率(Tr)等参数。光合仪叶室在 $24\sim 26^\circ\text{C}$ 条件下平衡至少 15 min,以保证在测量前达到稳定状态。光合作用测定时间为晴天上午的 9:00—11:00。

1.4 数据分析

采用 SAS 9.3 软件对烟草各生长发育指标进行方差分析(ANOVA)和多重比较(LSD 法),采用 Excel 2007 软件对所有试验数据进行统计整理并作图。

2 结果与分析

2.1 四环素对烟草植物学性状的影响

从烟草团棵期及现蕾期的植物学性状可以看出(表 1 和表 2):在团棵期,随着四环素添加量的增加,烟草的株高、茎围、最大叶长及叶数呈先增加后降低趋势,最大叶宽则呈先降低后增加趋势,ST1 处理的株高、茎围、最大叶长和叶片数均为最高,ST3 处理的株高和最大叶长最低,显著低于 ST1 处理,相比 CK 分别降低了 10.10%和 4.07%;在现蕾期,各处理烟草的植物学性状具有类似趋势,其中 ST3 处理的株高最低仅为 53.67 cm,比 CK 降低了 9.03%,叶片数量最多为 18 片,分别与 ST1 及 CK 处理差异显著。此外,四环素对各部位叶长、叶宽指标的影响无明显规律性。这表明低量四环素添加($5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)会刺激烟草生长,中高量四环素添加(50 、 $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)对烟草株高有抑制作用,却促进了茎围及叶片数的增加。

2.2 四环素对烟草根系生长发育的影响

各处理烟草的根系发育随生育期的变化如图 1

表 1 四环素对团棵期烟草植物学性状的影响

Table 1 Effect of tetracycline on botanical characters of tobacco at the rosette stage

处理 Treatments	株高 Height/cm	茎围 Stem girth/cm	最大叶长 Maximal leaf length/cm	最大叶宽 Maximal leaf width/cm	叶数 Productive leaf/片
CK	26.33±1.37ab	3.67±0.52a	36.83±2.70ab	13.00±0.89a	10.67±0.52b
ST1	28.00±3.22a	4.00±0.00a	37.67±0.52a	12.33±0.52a	12.00±0.00a
ST2	25.33±4.17ab	4.00±0.45a	37.33±2.25a	12.67±1.37a	11.33±1.03ab
ST3	23.67±1.03b	3.83±0.26a	35.33±2.73b	13.00±0.89a	11.33±0.52ab

注:表中同一列不同的小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference($P<0.05$) between different treatments within a column. The same below.

表 2 四环素对现蕾期烟草植物学性状的影响
Table 2 Effect of tetracycline on botanical characters of tobacco at the squaring stage

处理 Treatments	株高 Height/cm	茎围 Stem girth/cm	上部叶 Upper leaf		中部叶 Middle leaf		下部叶 Lower leaf		叶数 Productive leaf
			叶长 Leaf length/cm	叶宽 Leaf width/cm	叶长 Leaf length/cm	叶宽 Leaf width/cm	叶长 Leaf length/cm	叶宽 Leaf width/cm	
CK	59.00±5.99ab	3.67±0.52b	39.00±1.79a	13.00±0.89a	41.00±4.65a	13.00±0.89a	26.33±3.14ab	8.33±0.63c	15.67±1.03b
ST1	60.00±4.47a	4.33±0.26ab	37.33±1.03b	12.00±1.03a	36.67±4.93b	12.00±0.89b	27.33±1.03ab	9.33±0.52b	17.33±0.52ab
ST2	55.67±5.14ab	4.67±0.26a	40.67±2.88a	12.33±2.88a	39.67±3.61ab	12.33±1.03ab	30.33±1.86a	11.00±0.89a	17.00±1.55ab
ST3	53.67±4.41b	4.33±0.26ab	37.67±2.73ab	12.67±2.73a	40.00±1.79a	12.67±1.03a	25.00±1.79b	9.00±0.89bc	18.00±1.55a

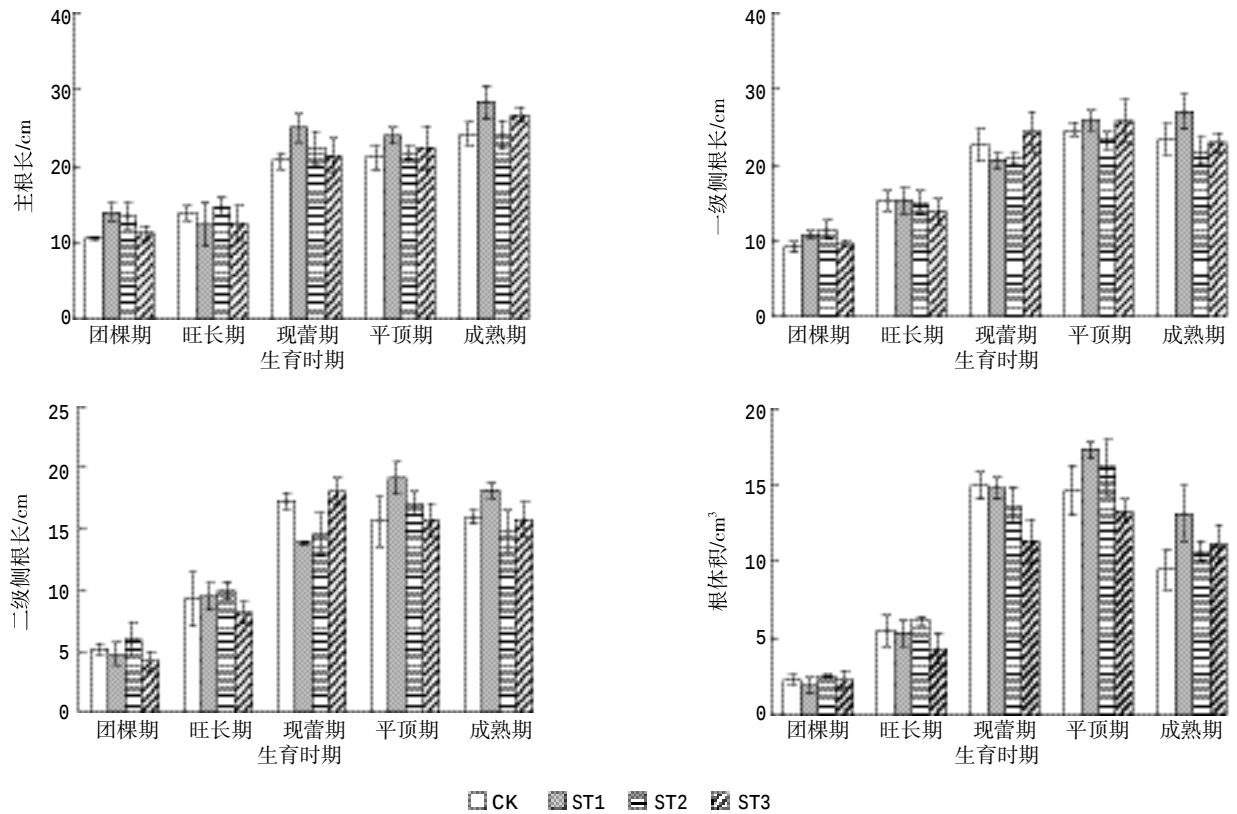


图 1 四环素对不同生育期烟草根系生长发育的影响
Figure 1 Effect of tetracycline on the growth of tobacco root in different growth stages

所示。从团棵期到现蕾期,各处理的烟草主根、一级侧根及二级侧根长和根体积均明显增加,现蕾期根长和根体积整体达到最大值,但各处理间差异不明显。从现蕾期到成熟期,各处理的根系发育参数变化平稳,但处理间的差异开始显现,其中 ST1 处理的主根长及一二级侧根长均显著高于 CK 处理($P<0.05$),其他处理则与 CK 无显著差异。在现蕾期,ST3 处理的根体积最小且显著低于 CK,在平顶期及成熟期,ST1 的根体积最大且显著高于 CK($P<0.05$),ST2 及 ST3 的根体积则与 CK 无显著差异。这表明,低量四环素添加能一定程度促进根系发育,高量四环素添加($500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)则对根系生长产生抑制作用,但抑制作用在烟草

生育后期逐渐减弱。
2.3 四环素对烟草生物量和根冠比的影响
从四环素对不同生育期烟草不同部位的生物量和根冠比特征可以看出(图 2),在团棵期和旺长期,烟地上部、地下部及叶片的生物量均以 ST2 处理稍高,ST3 处理最低且与其他处理差异显著($P<0.05$)。而在平顶期及成熟期,四环素处理的烟草各部位的生物量均不同程度地高于 CK 处理。从各处理的根冠比动态可以看出,在团棵期,四环素各处理能不同程度提高烟草的根冠比,而在其他生育期,四环素各处理的烟草根冠比整体上低于 CK,且随着添加量的增加有降低趋势。四环素在不同生育期对烟草生长发育的

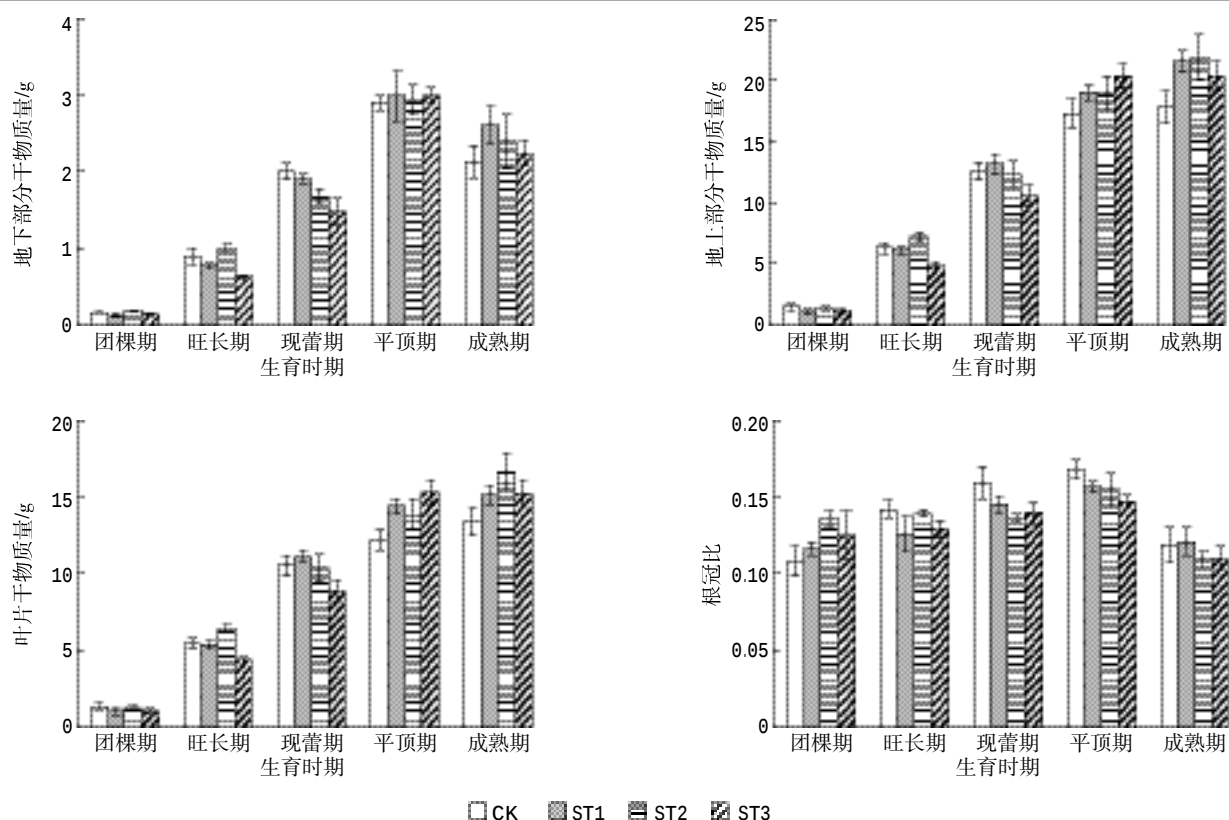


图2 四环素对不同生育期烟草各部位干物质量及根冠比的影响

Figure 2 Effect of tetracycline on the biomass of different part of tobacco and root to shoot ratio in different growth stages

影响不同,可能与土壤中四环素的降解及烟草生长发育对四环素胁迫的适应性有关,但其影响机理及适应机制还需要进一步研究。

2.4 四环素对烟草光合作用的影响

四环素对烟草不同生育期光合作用的影响如图3所示。不同四环素处理对烟草光合作用的影响随生育进程而变化,从团棵期到现蕾期,烟叶的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率等光合作用指标整体上均随烤烟生育期的延长呈先增加后降低的趋势。在团棵期,ST1、ST2及ST3处理与CK相比显著降低了烟叶的净光合速率和蒸腾速率;旺长期,ST3处理也显著降低了烟叶的净光合速率和蒸腾速率;现蕾期,ST2处理与CK相比则显著降低了烟叶的净光合速率和气孔导度。在平顶期和成熟期,四环素对烟叶光合作用指标的影响与烟草生育前期不同,四环素各处理的净光合速率、气孔导度及蒸腾速率均不同程度高于CK处理,而且以ST2及ST3处理的增幅相对较高。

此外,烟草的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率指标随生育期及四环素添加量的变化规律基本一致,胞间 CO_2 浓度则不同,其随生育期的变化与其他光合作用指标呈相反趋势,对四环素添加量的响应无明显

规律性。

3 讨论

从各处理烟草植物学性状及根系生长发育来看,土壤中添加低浓度四环素时促进、高浓度时则抑制烟草根系及地上部的生长发育。这与林琳等^[24]的研究结果类似,即低浓度四环素对小白菜幼苗生长具有一定促进作用,高浓度则有显著抑制作用。Batchelder^[25]研究也发现低浓度氯四环素和氧四环素均促进了萝卜和小麦的生长,但对玉米的生长则没有影响。鉴于不同作物对抗生素的耐受性及抗生素本身毒性的差异,四环素一定程度上会刺激作物的生长,也会对部分作物无影响或产生抑制作用^[26]。这因作物种类、抗生素类型、剂量及土壤性质等的不同而不同^[18]。本研究结果也显示,四环素对烟草生长发育的影响随生育时期而改变,在烟草生育前期,较高量的四环素对烟草主要植物学性状及根系发育产生抑制作用,从烟草的根体积及根系生物量可以看出,烟草根系生长的抑制率与四环素的浓度之间均存在明显的剂量-效应关系。这与许多的研究结果一致^[10,12,19-20]。四环素残留一般对作物根的毒性较大,在高浓度时显著抑制初生根的生

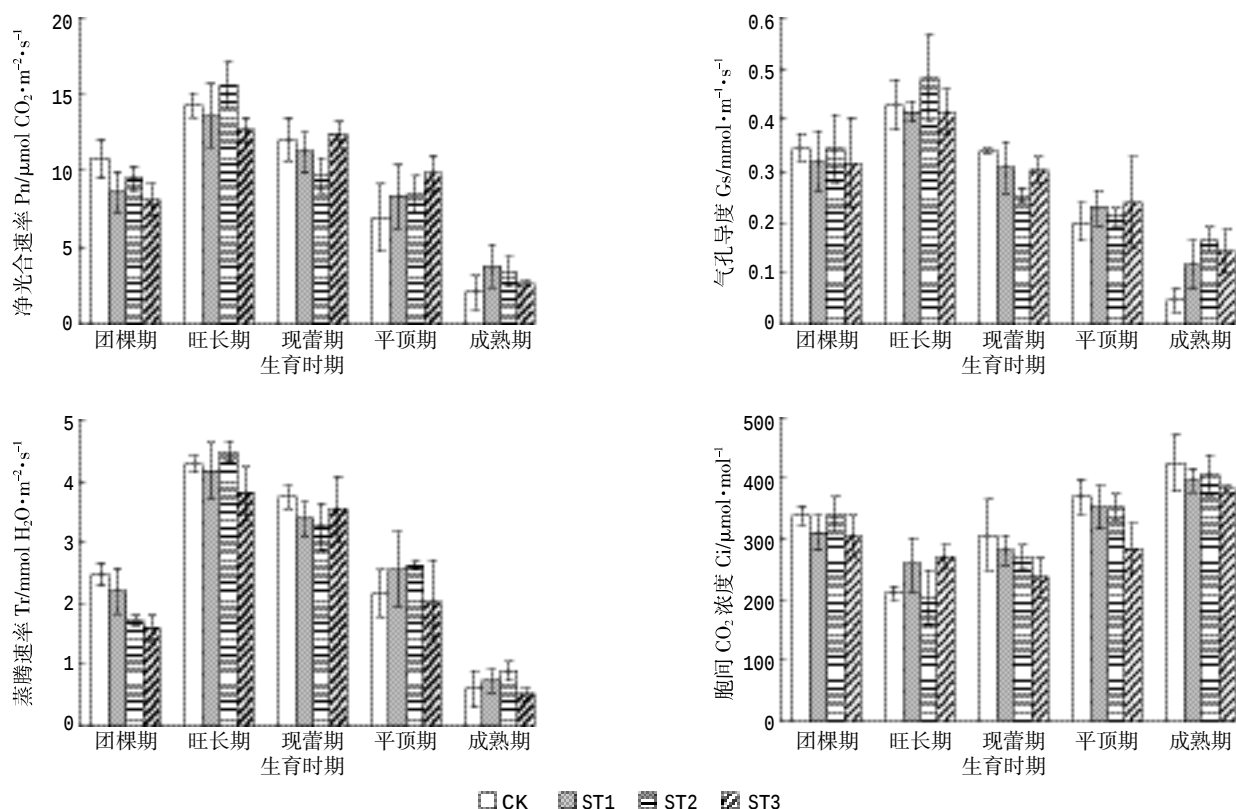


图 3 四环素对烟草不同生育期光合作用的影响

Figure 3 Effect of tetracycline on the photosynthesis of tobacco in different growth stages

长, 而且较高浓度的四环素类抗生素首先影响作物的根系生长及生理过程^[40], 可能与四环素类抗生素在作物根部的蓄积量较大及其生态毒性有关^[27]。一般认为抗生素对植物的毒性与抗生素和叶酸的相互竞争有关^[28]。在烟草生育后期, 四环素残留对烟草地上部、地下部及烟叶生物量的影响与对照相比, 均表现出一定程度的增加效应(图 2)。这一方面可能与四环素在土壤中的残留浓度随烟草生育进程不断降低有关, 在平顶期及成熟期, 各处理土壤中四环素的残留量已不足初始添加量的 5%(未发表数据)。另一方面可能与在抗生素胁迫后, 作物谷胱甘肽途径的解毒反应及生理适应有关^[44]。本研究还显示, 虽然较高量四环素对烟草生长发育具有一定生理毒性, 但随着抗生素在土壤中的不断被吸附、降解及生物有效性的降低^[29-30], 四环素的毒性效应下降, 同时烟草的适应性不断增强, 使得烟草生育后期, 四环素各处理的烟草各部位生物量均不同程度高于对照。但要进一步明确四环素对烟草生长发育及生态毒性的浓度阈值, 还需要更加深入和系统的研究。

光合作用是植物的一个重要生理过程, 它具有促进作物生长和养分吸收及抵抗生物与非生物胁迫等

重要功能^[31-32]。在本研究中, 四环素胁迫对烟草的光合作用具有重要影响。特别在烟草生育前期, 各四环素处理的烟草光合作用参数如净光合速率、气孔导度及蒸腾速率与对照相比均不同程度下降。这与抗生素对不同植物光合作用的研究结果一致。简建波等^[33]对水生植物的研究表明, 龙须菜的光合作用和有效光合速率等指标均随氯霉素浓度的升高而下降。Li 等^[34]对陆地小麦的研究结果显示, 其光合速率、蒸腾速率及气孔导度均随着土霉素浓度的增加而降低, 而胞间 CO_2 浓度则呈增加趋势。秦俊梅等^[35]在山西两种典型土壤上的研究表明, 四环素添加对玉米的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度及叶绿素等指标产生明显抑制作用。四环素类抗生素能抑制烟草等作物的光合作用, 可能是与通过影响光合作用中 1,5-二磷酸核酮糖羧化酶/加氧酶的活性及其光合电子传递能力而影响碳同化能力有关^[36]。新近研究也发现, 四环素胁迫能通过抑制线粒体的功能而损害植物的生长发育及光合特性^[37], 因为线粒体代谢通过光呼吸和氮同化而与光合作用密切相关^[38]。在烟草生育后期, 四环素各处理的净光合速率、气孔导度及蒸腾速率等光合作用参数与对照相比有不同程度的增加。因为一方面在烟

草生育后期,土壤中的四环素残留量不断降低,同时烟草对四环素胁迫建立了一定的抗性和适应性;另一方面可能与光合作用中的各参数对四环素胁迫的反馈调节有关^[39]。关于四环素类抗生素对烟草光合生理的影响及其内在机制,还需要进一步从细胞、分子及基因表达水平上进行深入研究。

目前,四环素类抗生素对水生植物生长发育及生态毒性效应的研究较为成熟^[40],而在土壤中,由于土壤组分的复杂性、环境的多样性及较大的缓冲性,均会影响抗生素的吸附、迁移及其生物降解等过程^[8,26],使得与水体环境相比,土壤四环素残留对陆地植物的生态毒性相对较小^[41]。如四环素在水溶液中对小麦根伸长 10%抑制浓度为 $25.88 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 在土壤中则为 $377.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[19]。但土壤是四环素类抗生素的最终归宿地和主要储存库,大量抗生素经不同途径进入土壤并长期累积造成残留污染,不仅影响土壤生态系统健康,而且通过吸收累积影响作物的生长发育及食物链安全^[10-12]。本文通过模拟土壤中不同四环素残留对烟草生长及光合作用的影响,验证了四环素对烟草的生态毒性效应。鉴于在我国广大农村地区,普遍存在含抗生素的畜禽粪便未经处理便直接施入农田,因而具有一定的生态毒性及潜在的环境风险,进行畜禽粪便的好氧堆肥或其他无害化处理是去除或消减其四环素类抗生素残留的较好方式^[42]。因此,后续在关注四环素类抗生素生态毒性效应的同时,四环素类抗生素的源头监控和消减技术、环境风险评估及农田应用应当引起高度重视。

4 结论

(1)四环素添加对烟草植物学性状具有重要影响,低量四环素添加($5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)刺激了烟草生长,但随着四环素添加量的增加,烟草株高有降低趋势,但茎围和叶片数有所增加,其中以四环素高量添加($500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)处理的烟草长势最差。

(2)四环素添加影响烟草的根系发育及根冠比特征,低量四环素添加能促进烟草生长及根系发育,高量四环素添加则产生抑制作用,但抑制会随生育进程而减弱。除烟草团棵期外,四环素各处理的烟草根冠比整体上均低于对照,且随四环素添加量的增加而降低。

(3)在烟草生育前期,四环素添加对烟草净光合速率、气孔导度及蒸腾速率等光合参数具有一定抑制作用,且抑制作用随四环素添加量的增加呈增加趋

势;而在烟草生育后期,四环素添加则对这些光合参数具有不同程度的促进作用。

(4)四环素对烟草生长发育及光合作用的生态毒性效应呈明显的剂量-效应关系,且其生态毒性随着烟草生育期而减弱。但四环素对烟草生态毒性的内在机制及其残留风险控制与评价还需要进一步的深入研究。

参考文献:

- [1] Richardson B J, Lam P K S, Martin M. Emerging chemicals of concern: Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in Asia, with particular reference to Southern China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, 50(9):913-920.
- [2] Sarmah A K, Meyer M T, Boxall A B A. A global perspective on the use, sales, exposure pathways, occurrence, fate and effects of veterinary antibiotics in the environment[J]. *Chemosphere*, 2006, 65(5):725-759.
- [3] Aust M O, Godlinski F, Travis G R, et al. Distribution of sulfamethazine, chlortetracycline and tylosin in manure and soil of Canadian feedlots after subtherapeutic use in cattle[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 156(3):1243-1251.
- [4] Golet E M, Strehler A, Alder A C, et al. Determination of fluoroquinolone antibacterial agents in sewage sludge and sludgetreated soil using accelerated solvent extraction followed by solidphase extraction[J]. *Analytical Chemistry*, 2002, 74(21):5455-5462.
- [5] 国 彬, 姚丽贤, 刘忠珍, 等. 广州市兽用抗生素的环境残留研究[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(5):938-945.
GUO Bin, YAO Li-xian, LIU Zhong-zhen, et al. Environmental residues of veterinary antibiotics in Guangzhou City, China[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2011, 30(5):938-945.
- [6] 张慧敏, 章明奎, 顾国平. 浙江地区畜禽粪便和农田土壤中四环素类抗生素残留[J]. *生态与农村环境学报*, 2008, 24(3):69-73.
ZHANG Hui-min, ZHANG Ming-kui, GU Guo-ping. Residues of tetracyclines in live stock and poultry manures and agricultural soils from North Zhejiang Province[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2008, 24(3):69-73.
- [7] Hamscher G, Sczesny S, Hoper H, et al. Determination of persistent tetracycline residues in soil fertilized with liquid manure by high-performance liquid chromatography with electrospray ionization tandem mass spectrometry[J]. *Analytical Chemistry*, 2002, 74(7):1509-1518.
- [8] 徐永刚, 宇万太, 马 强, 等. 环境中抗生素及其生态毒性效应研究进展[J]. *生态毒理学报*, 2015, 10(3):11-27.
XU Yong-gang, YU Wan-tai, MA Qiang, et al. The antibiotic in environment and its ecotoxicity: A review[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2015, 10(3):11-27.
- [9] Warman P R, Thomas R L. Chlortetracycline in soil amended with poultry manure[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1981, 61(1):161-163.
- [10] Kong W D, Zhu Y G, Liang Y C, et al. Uptake of oxytetracycline and its phytotoxicity to alfalfa (*Medicago sativa* L.) [J]. *Environmental Pollution*, 2007, 147(1):187-193.
- [11] 贺德春, 吴根义, 许振成, 等. 小白菜和白萝卜对四环素类抗生素的

- 吸收累积特征[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(6):1095-1099.
- HE De-chun, WU Gen-yi, XU Zhen-cheng, et al. Uptake of selected tetracycline antibiotics by pakchoi and radish from manure-amended soils[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(6):1095-1099.
- [12] 崔 馨, 乔显亮, 韩成伟, 等. 生菜对土霉素的吸收及其植物毒性[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3):1038-1042.
- CUI Xin, QIAO Xian-liang, HAN Cheng-wei, et al. Uptake of oxytetracycline and its phytotoxicity to lettuce[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(3):1038-1042.
- [13] 安 靖, 周启星, 刘维涛. 土霉素对小麦种子发芽与幼苗生长发育的生态毒性[J]. 环境科学, 2009, 30(10):3022-3027.
- AN Jing, ZHOU Qi-xing, LIU Wei-tao. Ecotoxicological effects of oxytetracycline on wheat (*Triticum aestivum*) based on seed germination and seedling development[J]. Environmental Science, 2009, 30(10):3022-3027.
- [14] Farkas M H, Berry J O, Aga D S. Chlortetracycline detoxification in maize via induction of glutathione transferases after antibiotic exposure[J]. Environmental Science and Technology, 2007, 41(4):1450-1456.
- [15] Bradel B G, Preil W, Jeske H. Remission of the free-branching pattern of *Euphorbia pulcherrima* by tetracycline treatment[J]. Journal of Phytopathology, 2000, 148(11/12):587-590.
- [16] Kasai K, Kanno T, Endo Y, et al. Guanosine tetra and pentaphosphate synthase activity in chloroplasts of a higher plant: Association with 70S ribosomes and inhibition by tetracycline[J]. Nucleic Acids Research, 2004, 32(19):5732-5741.
- [17] Liu F, Ying G G, Tao R, et al. Effects of six selected antibiotics on plant growth and soil microbial and enzymatic activities[J]. Environmental Pollution, 2009, 157(5):1636-1642.
- [18] Jemba P K. The potential impact of veterinary and human therapeutic agents in manure and biosolids on plants grown on arable land: A review[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2002, 93(1):267-278.
- [19] 鲍艳宇, 周启星, 谢秀杰. 四环素类抗生素对小麦种子芽与根伸长的影响[J]. 中国环境科学, 2008, 28(6):566-570.
- BAO Yan-yu, ZHOU Qi-xing, XIE Xiu-jie. Influence of tetracycline kind antibiotics on the control of wheat germination and elongation[J]. China Environmental Science, 2008, 28(6):566-570.
- [20] 葛成军, 俞花美, 焦 鹏. 两种四环素类兽药抗生素对白菜种子发芽与根伸长抑制的毒性效应[J]. 生态环境学报, 2012, 21(6):1143-1148.
- GE Cheng-jun, YU Hua-mei, JIAO Peng. Toxicological effects of two tetracycline antibiotics on the inhibition of seed germination and root elongation of Chinese cabbages[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(6):1143-1148.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- LU Ru-kun. Analytical method of soil agro-chemistry[M]. Beijing: Chinese Agriculture Science and Technology Press, 2000.
- [22] 马丽丽, 郭昌胜, 胡 伟, 等. 固相萃取-高效液相色谱-串联质谱法同时测定土壤中氟喹诺酮、四环素和磺胺类抗生素[J]. 分析化
- 学, 2010, 38(1):21-26.
- MA Li-li, GUO Chang-sheng, HU Wei, et al. Simultaneous extraction and determination of eighteen fluoroquinolone, tetracycline and sulfonamide antibiotics from soils using solid-phase extraction and liquid chromatography tandem mass spectrometry[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2010, 38(1):21-26.
- [23] 国家烟草专卖局. YC/T 142—2010 烟草农艺性状调查方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- State Tobacco Monopoly Bureau. YC/T 142—2010, Investigating and measuring methods of agronomical character of tobacco[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.
- [24] 林 琳, 安 靖, 周启星. 土壤四环素污染对小白菜幼苗生长发育的生态毒性[J]. 环境科学, 2011, 32(8):2430-2435.
- LIN Lin, AN Jing, ZHOU Qi-xing. Ecotoxicological effects of tetracycline on the seedling development of Chinese white cabbage (*Brassica rapa* L. *Chinensis* Group.) in soil[J]. Environmental Science, 2011, 32(8):2430-2435.
- [25] Batchelder A R. Chlortetracycline and oxytetracycline effects on plant growth and development in soil systems[J]. Journal of Environmental Quality, 1982, 11(4):675-678.
- [26] 孔维栋, 朱永官. 抗生素类兽药对植物和土壤微生物的生态毒理学效应研究进展[J]. 生态毒理学报, 2007, 2(1):2-9.
- KONG Wei-dong, ZHU Yong-guan. A review on ecotoxicology of veterinary pharmaceuticals to plants and soil microbes[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2007, 2(1):2-9.
- [27] Migliore L, Cozzolino S, Fiori M. Phytotoxicity to and uptake of enrofloxacin in crop plants[J]. Chemosphere, 2003, 52(7):1233-1244.
- [28] Migliore L, Civitareale C, Cozzolino S, et al. Laboratory models to evaluate phytotoxicity of sulphadimethoxine on terrestrial plants[J]. Chemosphere, 1998, 37(14):2957-2961.
- [29] 张劲强, 董元华, 安 靖, 等. 兽药抗生素在土壤环境中的行为[J]. 土壤, 2005, 37(4):353-361.
- ZHANG Jin-qiang, DONG Yuan-hua, AN Qiong, et al. Environmental fate of veterinary medicines in soil[J]. Soils, 2005, 37(4):353-361.
- [30] Pils J R V, Laird D A. Sorption of tetracycline and chlortetracycline on K- and Ca-saturated soil clays, humic substances, and clay-humic complexes[J]. Environmental Science and Technology, 2007, 41(6):1928-1933.
- [31] Bunce J A. Acclimation of photosynthesis to temperature in *Arabidopsis thaliana* and *Brassica oleracea*[J]. Photosynthetica, 2008, 46(4):517-524.
- [32] Yang C W, Jianer A, Li C Y, et al. Comparison of the effects of salt stress and alkali stress on photosynthesis and energy storage of an alkali-resistant halophyte *Chloris virgata*[J]. Photosynthetica, 2008, 46(2):273-278.
- [33] 简建波, 邹定辉, 刘文华, 等. 两种抗生素对龙须菜的光合生理效应[J]. 生态学报, 2011, 31(2):326-334.
- JIAN Jian-bo, ZOU Ding-hui, LIU Wen-hua, et al. Photosynthetic responses of *Gracilaria lemaneiformis* to two antibiotics[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(2):326-334.
- [34] Li Z J, Xie X Y, Zhang S Q, et al. Negative effects of oxytetracycline on

- wheat (*Triticum aestivum* L.) growth, root activity, photosynthesis, and chlorophyll contents[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2011, 10(10): 1545-1553.
- [35] 秦俊梅, 胡可, 马祥爱, 等. 山西省典型土壤施入含四环素鸡粪对玉米生长的影响[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2013, 33(1): 82-87.
- QIN Jun-mei, HU Ke, MA Xiang-ai, et al. Effect of applying chicken manure containing tetracycline to typical soils in Shanxi Province on corn growth[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University(Nature Science Edition)*, 2011, 33(1): 82-87.
- [36] Li Z J, Xie X Y, Zhang S Q, et al. Wheat growth and photosynthesis as affected by oxytetracycline as a soil contaminant[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(2): 244-250.
- [37] Moullan N, Mouchiroud L, Wang X, et al. Tetracyclines disturb mitochondrial function across eukaryotic models: A call for caution in biomedical research[J]. *Cell Reports*, 2015, 10(10): 1681-1691.
- [38] Schwarzländer M, Finkemeier I. Mitochondrial energy and redox signaling in plants[J]. *Antioxidants & Redox Signaling*, 2013, 18(16): 2122-2144.
- [39] Nandy P, Das S, Ghose M, et al. Effects of salinity on photosynthesis, leaf anatomy, ion accumulation and photosynthetic nitrogen use efficiency in five Indian mangroves[J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2007, 15(4): 347-357.
- [40] Yasser E L N, Adli A. Toxicity of single and mixtures of antibiotics to cyanobacteria[J]. *Journal of Environmental & Analytical Toxicology*, 2015, 5: 274-281.
- [41] 张浩, 罗义, 周启星. 四环素类抗生素生态毒性研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(2): 407-413.
- ZHANG Hao, LUO Yi, ZHOU Qi-xing. Research advancement of ecotoxicity of tetracycline antibiotics[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2): 407-413.
- [42] 仇天雷, 高敏, 韩美琳, 等. 鸡粪堆肥过程中四环素类抗生素及抗性细菌的消减研究[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(4): 795-800.
- QIU Tian-lei, GAO Min, HAN Mei-lin, et al. Decreases of tetracyclines and antibiotics-resistant bacteria during composting of chicken manure[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2015, 34(4): 795-800.