

张圣新, 罗盼盼, 鲍恩东, 等. 4 种叶菜对强力霉素的吸收与富集特征[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(5): 1066-1071.

doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2018.05.014

4 种叶菜对强力霉素的吸收与富集特征

张圣新¹, 罗盼盼¹, 鲍恩东², 尚斌³, 王冉¹, 魏瑞成¹

(1.江苏省食品质量安全重点实验室-省部共建国家重点实验室培育基地,农业部农产品质量安全风险评估实验室(南京),江苏省农业科学院农产品质量安全与营养研究所,江苏 南京 210014; 2.南京农业大学,江苏 南京 210095; 3.中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所,北京 100081)

摘要: 通过水培试验,对畜牧业中广泛使用的典型兽药强力霉素,开展了 4 种叶菜(绿罗莎、苦苣、绿箭和绿直立)的吸附富集特征及去除规律研究,评价抗生素环境污染的植物修复能力。结果表明:强力霉素在有蔬菜种植的培养液中降解速度明显快于无蔬菜种植的培养液,空白对照组中去除率 37.8%,而在叶菜处理组中去除率超过 95%,在空白对照培养液以及绿罗莎、苦苣、绿箭和绿直立的培养液中强力霉素去除半衰期分别为 22.1 d、1.4 d、1.5 d、2.3 d 和 2.8 d,与空白对照相比差异极显著($P<0.01$);在吸收富集能力上,绿罗莎和苦苣茎叶部分对强力霉素具有较强的累积作用,富集系数分别为 7.20 和 4.95,而绿箭和绿直立的富集系数分别为 0.76 和 0.49,累积作用相对较弱。说明富集能力较强的蔬菜作物可作为降低抗生素环境污染的备选植物。

关键词: 强力霉素; 富集; 植物修复

中图分类号: X592 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2018)05-1066-06

Uptake and accumulation of doxycycline in four kinds of leaf vegetables

ZHANG Sheng-xin¹, LUO Pan-pan¹, BAO En-dong², SHANG Bin³, WANG Ran¹, WEI Rui-cheng¹

(1.Key Lab of Food Quality and Safety of Jiangsu Province-State Key Laboratory Breeding Base, Key Lab of Agro-product Safety Risk Evaluation (Nanjing), Ministry of Agriculture, Institute of the Quality Safety and Nutrition in Agricultural Products, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2.Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 3.Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: To evaluate the phytoremediation of the antibiotic environmental pollution, hydroponic experiment was carried out to study adsorption enrichment characteristics and removal law of veterinary drug doxycycline in four kinds of leaf vegetables (Lvluosha, endive, Lvjian, Lvzhili). The results showed that the degradation rate of doxycycline in the culture medium with vegetables was significantly faster than that in the medium without vegetables. The removal rate was 37.8% in the control group, while the removal rate in the leaf vegetable experimental group was more than 95.0%. Compared with the control group, the difference was very significant ($P<0.01$) in the vegetable experimental group and the removal half-lives were 22.1 d, 1.4 d, 1.5 d, 2.3 d and 2.8 d, respectively. In the capacity of absorption and enrichment, the stem and leaf of Lvluosha (*Lactuca sativa*) and endive (*Sonchus oleraceus*) had stronger accumulation of doxycycline, and bioconcentration factor (BCF) values were 7.20 and 4.95, respectively. The capacity of accumulation was relatively weaker in

Lvjian (*Lactuca sativa*) and Lvzhili (*Lactuca sativa*), and BCF values were 0.76 and 0.49, respectively. The research results indicated that the vegetable with strong enrichment ability could be used as an alternative plant to reduce the environmental pollution of antibiotics.

Key words: doxycycline; accumulation; phytoremediation

收稿日期:2018-01-15

基金项目:国家农产品质量安全风险评估项目(GJFP201701203、GJFP201801203)

作者简介:张圣新(1992-),女,江苏镇江人,硕士研究生,从事抗生素安全评价研究。(E-mail)17351781405@163.com

通讯作者:魏瑞成,(E-mail)rcwei79@jaas.ac.cn

在畜禽养殖业中,兽药抗生素在提高生产能力等方面发挥了重要作用,中国每年兽药使用量大概占全球消耗量的25%左右^[1]。据报道,动物采食饲用抗生素后,约有30%~90%兽药以母体或代谢物的形式经动物粪尿等排泄物排出^[2]。目前,中国尚未制定动物粪便和土壤中抗生素相关污染标准^[3],粪肥的施用引起抗生素在环境介质及食物链中迁移累积。研究发现,规模化养殖场畜禽粪污中^[4-8]和农产品产地土壤中^[9-10]可检测到四环素类、磺胺类、喹诺酮类等多种抗生素药物。环境中抗生素对作物生长具有毒性效应^[11-12],会诱导处于长期选择压下的病原菌产生抗性^[13],长期摄入受到污染的产品可能对易感人群产生不良反应^[14-16]。

强力霉素(Doxycycline, DOX)为四环素类抗生素,在养殖场广泛使用,四环素类抗生素对土壤有较强的吸附力,在环境中不易降解等^[17-18]。通过超富集作物品种吸收进行植物修复,或者通过充分利用低积累作物品种的种植来减少土壤污染从而生产安全食品,利用超富集作物品种修复污染土壤是当前较为经济有效的环境中抗生素污染的修复手段^[19-20]。在富集植物的筛选中,水培试验是理想的手段,虽然液体中植物根部对抗生素的吸收量相对于土壤环境下较高,但是水培方法周期短和环境条件可操控,能充分排除干扰因素并快速筛选出富集植物。

本试验以强力霉素为研究对象,考察4种叶菜品种在水培条件下对强力霉素的富集特征,比较不同植物对强力霉素的吸收量和富集系数的变化,研究强力霉素在培养溶液中的去除规律,为科学认识蔬菜中抗生素残留风险以及抗生素污染土壤的植物修复技术应用提供参考和借鉴。

1 材料与方法

1.1 供试材料

选择绿罗莎、苦苣、绿直立和绿箭4种蔬菜品种为试验对象。强力霉素标准品(纯度 $\geq 97.0\%$)购自Dr. Ehrenstorfer公司,甲醇和乙腈(色谱纯)购自Tedia公司,乙二胺四乙酸二钠、柠檬酸、磷酸氢二钠、盐酸、氢氧化钠、乙二酸、硝酸钙、硝酸钾、乙二胺四乙酸二钠铁、磷酸二氢钾、磷酸二氢铵、硫酸镁、硼酸、硫酸锌、硫酸铜、硫酸锰和钼酸铵均为国产分析纯试剂。

1.2 仪器设备

三重四极杆质谱仪(Agilent 6410,配ESI源)、高效液相色谱仪(Agilent1200S)为Agilent公司产品,分析天平(AL204)和pH计(320)为梅特勒-托利多仪器有限公司产品,高速离心机(Eppendorf)为德国Eppendorf公司产品,氮吹仪(N-EVAPTM112)为美国Organomation公司产品,固相萃取装置为美国Supelco公司产品,HLB固相萃取柱(200 mg, 6 ml)为美国Waters公司。

1.3 营养液配制和预培养

水培营养液由营养液A和营养液B组成,使用前按照等比例混合。营养液A成分为:硝酸钙413.300 mg/L、硝酸钾404.400 mg/L和乙二胺四乙酸二钠铁40.000 mg/L;营养液B成分为:磷酸二氢钾68.000 mg/L、磷酸二氢铵32.000 mg/L、硫酸镁246.000 mg/L、硼酸2.000 mg/L、硫酸锌0.430 mg/L、硫酸铜1.360 mg/L、硫酸锰0.100 mg/L和钼酸铵0.034 mg/L。

在蔬菜收割前20 d,将移栽的蔬菜苗定植于黑色塑料试验盆内,每盆4株。试验设置5个处理组,第1组为含有20 mg/L强力霉素的空白对照组,第2至第5组分别为种植绿罗莎、苦苣、绿直立和绿箭的处理组。加入营养液后在温室中预培养3 d,日光灯补充光照,光暗比为12 h:12 h,昼夜温差10℃。培养过程中补充营养液并记录用量。

1.4 样品采集和强力霉素含量测定

试验时向每个试验盆内加入一定浓度和体积的强力霉素储备溶液,使培养液中强力霉素质量浓度为20 mg/L。分别在试验的第0 d、1 d、2 d、3 d、4 d、5 d、7 d、9 d、11 d、13 d、15 d对不同试验组植株和培养液取样,将去除根部的植株用蒸馏水冲洗,晾干后用粉碎待测。

准确称取样品5.0 g至50 ml离心管中,加入20 ml甲醇和0.1 mol/L Na_2EDTA -Mcllvaine缓冲溶液(pH=6.0),漩涡30 s,振荡10 min,超声波处理20 min,10 000 r/min离心5 min,移取上清液至另一离心管中,重复提取2次,合并上清液,于40℃下氮气吹至5~10 ml,加0.1 mol/L Na_2EDTA -Mcllvaine缓冲溶液(pH=6.0)稀释至30~50 ml,备用。将HLB固相萃取柱依次用6 ml甲醇、6 ml 0.1 mol/L Na_2EDTA -Mcllvaine缓冲溶液(pH=4.0)活化,将上述提取液过柱,流速 ≤ 3 ml/min,用10 ml水淋洗,抽

干。8 ml 甲醇洗脱,收集洗脱液,于 40 ℃ 下氮气吹干,加入流动相 1.0 ml 溶解残余物,超声波处理 2 min,混匀后过 0.22 μm 尼龙滤膜,待仪器测定。

测定参数: C_{18} 柱色谱柱 (2.1 mm×100.0 mm), 流速为 0.30 ml/min, 流动相为甲醇和 0.1% 甲酸溶液 (体积比 60:40); 电喷雾离子源正离子模式, 喷雾电压为 4.0 kV, 气体温度为 350 ℃, 气体流速为 12 L/min, 强力霉素特征离子对为 m/z 445>428 (定量离子), m/z 445>410 以及 m/z 445>154。测定时为了减少基质效应干扰, 植株样品的标准曲线用无抗生素处理的植株提取溶液配制, 培养液样品的标准曲线用营养液作为背景溶液配制。强力霉素在叶菜样品中平均回收率 72.16%~88.64%, 日内相对标准偏差为 3.51%~6.87%, 日间相对标准偏差为 1.44%~1.82%, 方法满足试验研究要求。

1.5 数据分析

数据应用 SPSS 16.0 软件进行 Duncan's 差异性统计分析。富集系数计算 (Bioconcentration factor, BCF) 公式为 $BCF = C_{\text{植株}}/C_{\text{培养液}}$, 式中, $C_{\text{植株}}$ 和 $C_{\text{培养液}}$ 分别为植株中强力霉素含量和培养液中强力霉素质量浓度。

2 结果与分析

2.1 水培叶菜对强力霉素的吸收转移

4 种供试叶菜对强力霉素具有相似的吸收与转移规律 (图 1)。在处理 7 d, 4 种蔬菜的茎和叶中强力霉素含量快速上升, 在第 5~7 d 达到最大吸收值, 随后随着暴露时间延长含量急剧下降。绿罗莎茎和叶中强力霉素含量在处理 5 d 达到最大值 (20.60 mg/kg)。在处理 24 h, 强力霉素在绿罗莎茎、叶中的含量为 2.59 mg/kg, 在处理结束时 (15 d), 绿罗莎茎、叶中的含量为 6.18 mg/kg, 分别是其最大吸收量的 12.6% 和 30.0%。苦苣、绿直立和绿箭茎、叶中强力霉素含量均在处理后 7 d 达到最大值, 分别为 10.40 mg/kg、1.79 mg/kg 和 3.54 mg/kg。在处理 24 h, 苦苣、绿直立和绿箭茎、叶中强力霉素的含量分别为 1.83 mg/kg、0.60 mg/kg 和 0.31 mg/kg, 分别是最大吸收量的 17.6%、33.6% 和 8.9%。处理后 15 d, 苦苣、绿直立和绿箭茎、叶中强力霉素的含量分别为 4.07 mg/kg、0.39 mg/kg 和 0.81 mg/kg, 分别是其最大吸收量的 39.1%、21.7% 和 23.0%。

尽管 4 种供试叶菜对强力霉素的吸收和转移具有相似的规律, 但在达到对强力霉素最大吸收值所需要的时间和最大吸收量等方面仍然存在差别。通过比较发现, 强力霉素在绿罗莎茎、叶中的含量是其在苦苣、绿箭和绿直立茎、叶中含量的 2 倍、6 倍和 11 倍, 强力霉素在苦苣茎、叶中的含量是其在绿箭和绿直立茎、叶中含量的 3 倍和 6 倍。说明 4 种叶菜对强力霉素的吸收能力具有很大差异, 在同一处理质量浓度下, 绿罗莎富集能力最大, 其次是苦苣, 它们与其他 2 种蔬菜相比较差异均极显著 ($P<0.01$), 绿箭和绿直立之间富集能力差异不显著, 4 种叶菜对强力霉素的吸收富集能力高低顺序为: 绿罗莎>苦苣>绿箭>绿直立。

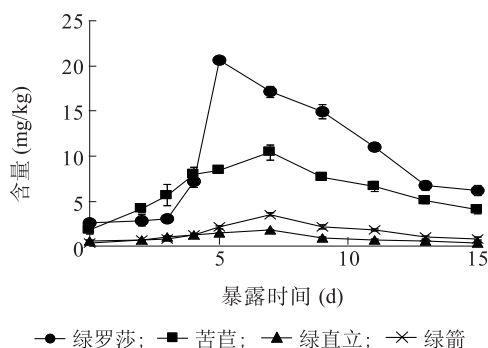


图 1 不同暴露时间下 4 种叶菜中强力霉素含量的变化

Fig.1 Changes of doxycycline concentration in four kinds of leaf vegetables at different exposure time

2.2 不同处理时间下 4 种叶菜培养液中强力霉素质量浓度的变化

在不同处理时间下培养液中强力霉素质量浓度变化如图 2 所示。强力霉素在 4 种叶菜培养液中具有相似的去规律, 在空白对照组 (无蔬菜植株) 的培养液中去最慢, 在绿直立和绿箭的培养液中的去除速度比对照组快, 在绿罗莎和苦苣培养液中去除速度最快。处理后 1 d, 绿罗莎和苦苣的培养液中强力霉素去除率为 53%~59%, 绿箭和绿直立的培养液中强力霉素去除率为 48% 左右, 与初始浓度相比差异均显著 ($P<0.01$), 而空白对照组去除率仅为 2.3%, 与初始浓度相比差异不显著, 说明绿罗莎、苦苣、绿直立和绿箭植株对强力霉素均有较强的吸收和富集能力。

在处理 15 d 后, 强力霉素在空白对照培养液中去除了 37.8%, 在 4 种叶菜培养液中去除率超过

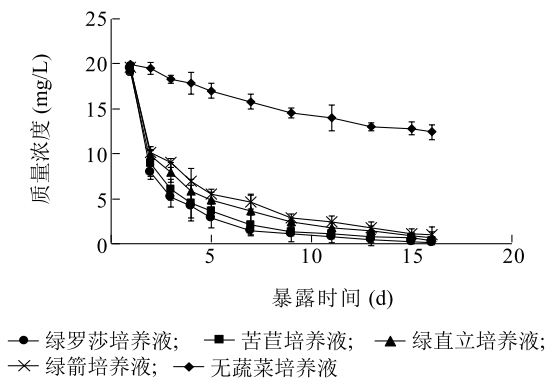


图2 不同暴露时间下4种叶菜培养液中强力霉素含量变化
Fig.2 Changes of doxycycline concentration in different culture solutions of four kinds of leaf vegetables at different exposure time

95.0%,与对照组比较差异极显著($P<0.01$)。强力霉素在空白对照、绿罗莎、苦苣、绿箭和绿直立的培养液中的去除半衰期分别为22.1 d、1.4 d、1.5 d、2.3 d和2.8 d(表1)。

2.3 水培叶菜对强力霉素的富集系数

绿罗莎、苦苣、绿箭和绿直立4种叶菜茎和叶对强力霉素的富集系数分别为7.20、4.95、0.76、0.49。富集能力大小依次为绿罗莎>苦苣>绿箭>绿直立。绿罗莎和苦苣对强力霉素的富集系数均大于1,说明这2种叶菜对强力霉素的吸收富集能力较强,属于超富集作物,而绿箭和绿直立对强力霉素的富集系数均小于1。说明对强力霉素的吸收和累积大小与植物种类有关,这与已经报道的四环类抗生素在植物中吸收特征相一致^[21]。

表1 强力霉素在4种叶菜培养液中的降解参数
Table 1 Degradation parameter of doxycycline in different culture solutions of four kinds of leaf vegetables

处理	一级动力学方程	半衰期(d)	相关系数(r)
空白对照 (无蔬菜植株)	$y = 20.225e^{-0.032x}$	22.1	0.990 7
绿罗莎	$y = 14.507e^{-0.28x}$	1.4	0.985 3
苦苣	$y = 13.393e^{-0.226x}$	1.5	0.976 8
绿箭	$y = 15.295e^{-0.194x}$	2.3	0.985 6
绿直立	$y = 16.052e^{-0.178x}$	2.8	0.987 1

3 讨论

本研究结果表明,在短时间内4种叶菜对强力

霉素具有相似的吸收和转移的规律,但是由于植物对抗生素等有机污染物的吸收转移能力,与植物和有机污染物的特性以及环境污染强度等因素有显著相关性^[22],所以4种蔬菜的富集能力表现出明显差异,在同一处理质量浓度下,吸收富集能力高低顺序为:绿罗莎>苦苣>绿箭>绿直立。许多文献也报道,不同种类的水生植物对介质中抗生素的吸收效率存在差异。崔馨等^[23]采用水培法研究了生菜对土霉素的吸收效果,发现生菜对土霉素的吸收量与营养液中土霉素质量浓度呈正相关。Lu等^[24]研究发现凤眼莲根系与水体接触12 h后,对水体中四环素的吸收率可达70%。Hijosavalsero等^[25]研究了人工湿地污水处理系统对强力霉素、甲氧苄啶、磺胺甲恶唑等抗生素的吸收效果,同样发现不同种类的植物对抗生素吸收存在明显差异。由此可见,通过种植合适的植物可以进行污染土壤的植物修复。

处理15 d后,在4种叶菜培养液中强力霉素去除率超过95.0%,而在空白对照培养液中去除率仅37.8%,可见培养液中强力霉素含量减少主要是受到植物吸收的影响。Azanu等^[26]发现胡萝卜和生菜能够吸收四环素和阿莫西林,并遵循剂量效应关系。Mwm^[27]用土霉素和泰乐菌素的发酵垃圾作为番茄肥料时发现其可以吸收残留的抗生素。Dong等^[28]报道11种蔬菜在2种不同土壤中对金霉素、莫能菌素、磺胺二甲嘧啶、泰乐菌素和维及霉素存在不同程度的吸收。这些结论均与本研究一致,说明强力霉素含量的减少可能与蔬菜的生长稀释和植物体内代谢及组织形成无法提取的结合残留物相关^[29]。研究发现植物对环境中的污染物的吸收机制主要有2种,分别是植物的外排机制(即将大部分污染物累积在根部)和植物的积累(将根系吸收的污染物多数运输和贮存到地上部分)^[30]。通过强力霉素在4种叶菜培养液中的去除试验发现,处理第1 d 4种蔬菜对强力霉素的去除率为48%~59%,并被植物根吸附后向茎叶转移,在试验的5~7 d,绿罗莎和苦苣茎、叶中强力霉素含量是绿箭和绿直立中的3~11倍。据报道, $1.0<\lg K_{ow}$ (正辛醇水/分配系数) <3.5 的有机物较易被植物吸收并在体内迁移,且在根、茎、叶中均有积累^[31]。本研究中,强力霉素被植物吸收后在蔬菜体内迁移,且在绿罗莎和苦苣中的迁移能力比在绿箭和绿直立中的强,而绿箭和绿直立的植物外排机制能力较强,植物积累机制能

力较弱。近年来有研究者发现抗生素也能从蔬菜中转归到环境中^[32]。植物的根际环境是一个极其复杂的微环境,关于强力霉素在根系环境中的吸附机制有待进一步研究。

本试验发现,叶菜绿罗莎和苦苣对培养液中强力霉素均有很强的吸收富集作用,富集系数分别为7.20和4.95,属于超富集作物,而绿箭和绿直立对培养液中强力霉素的吸收富集能力较弱,富集系数分别为0.76和0.49,属于低积累蔬菜作物。这些不同蔬菜之间富集系数的差异证明植物对抗生素的吸收可能取决于植物的种类^[28],而同一株植物不同时间的吸收差异可能是由于植物不同生长阶段会影响抗生素在其体内的分布和积累^[33]。除此之外,抗生素的物理化学性质和环境暴露都可能影响植物对抗生素的富集^[34]。因此可以利用超富集植物(例如绿罗莎和苦苣)进行污染土壤的植物修复,或者种植低积累作物品种(例如绿箭和绿直立)以保证食品安全,以及利用抗生素低积累作物品种和超富集植物间套种植对污染土壤进行修复并生产出较为安全的农产品,以实现经济效益和生态功能的有机结合。

参考文献:

- [1] ZHANG Q Q, YING G G, PAN C G, et al. Comprehensive evaluation of antibiotics emission and fate in the river basins of China: source analysis, multimedia modeling, and linkage to bacterial resistance [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49 (11): 6772-6782.
- [2] SARMAH A K, MEYER M T, BOXALL A B. A global perspective on the use, sales, exposure pathways, occurrence, fate and effects of veterinary antibiotics (VAs) in the environment. [J]. *Chemosphere*, 2006, 65(5): 725-759.
- [3] 李克强. 畜禽规模养殖污染防治条例[J]. *中国乳业*, 2013 (12): 39-41.
- [4] 李霞, 邓立刚, 王峰恩, 等. 堆肥消减畜禽粪便中病原微生物及抗生素残留的研究进展[J]. *山东农业科学*, 2017, 49(7): 161-166.
- [5] WEI R, GE F, HUANG S, et al. Occurrence of veterinary antibiotics in animal wastewater and surface water around farms in Jiangsu Province, China [J]. *Chemosphere*, 2011, 82 (10): 1408-1414.
- [6] ZHAO L, DONG Y H, WANG H. Residues of veterinary antibiotics in manures from feedlot livestock in eight provinces of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(5): 1069.
- [7] 慕亚芹, 李群, 崔江浩. 畜禽养殖的环境压力探讨[J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(1): 377-379.
- [8] 朱秀辉, 曾巧云, 解启来, 等. 广州市北郊蔬菜基地土壤四环素类抗生素的残留及风险评估[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36 (11): 2257-2266.
- [9] WEI R, GE F, ZHANG L, et al. Occurrence of 13 veterinary drugs in animal manure-amended soils in Eastern China [J]. *Chemosphere*, 2016, 144: 2377-2383.
- [10] 苏丹丹, 刘惠玲, 王梦梦. 施用粪肥蔬菜基地抗生素残留的研究进展[J]. *环境保护科学*, 2015(1): 117-120.
- [11] 王盼亮, 张昊, 王瑞飞, 等. 抗生素暴露对小白菜幼苗生长及内生细菌的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36 (9): 1734-1740.
- [12] 魏子艳, 王金花, 夏晓明, 等. 三种抗生素对蔬菜种子芽与根伸长的生态毒性效应[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33 (2): 237-242.
- [13] HEUER H, SCHMITT H, SMALLA K. Antibiotic resistance gene spread due to manure application on agricultural fields [J]. *Current Opinion in Microbiology*, 2011, 14(3): 236-243.
- [14] 张娟, 孙英新, 于功昌. 抗生素的雄性生殖毒性作用研究进展[J]. *环境与健康杂志*, 2012(10): 952-954.
- [15] LM C. Altering the intestinal microbiota during a critical developmental window has lasting metabolic consequences [J]. *Cell*, 2014, 158(4): 705-721.
- [16] WANG H, WANG B, ZHAO Q, et al. Antibiotic body burden of Chinese school children: a multisite biomonitoring-based study [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(8): 5070-5079.
- [17] 杨晓芳, 杨涛, 王莹, 等. 四环素类抗生素污染现状及其环境行为研究进展[J]. *环境工程*, 2014, 32(2): 123-127.
- [18] 李伟明, 鲍艳宇, 周启星. 四环素类抗生素降解途径及其主要降解产物研究进展[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(8): 2300-2308.
- [19] ZHANG D, GERSBERG R M, NG W J, et al. Removal of pharmaceuticals and personal care products in aquatic plant-based systems: a review. [J]. *Environmental Pollution*, 2014, 184(1): 620-639.
- [20] 汤贝贝, 张振华, 卢信, 等. 养殖废水中抗生素的植物修复研究进展[J]. *江苏农业学报*, 2017, 33(1): 224-232.
- [21] 崔诗瑶, 李婧, 曹海艳, 等. 三种蔬菜对水中四环素的吸收累积效应[J]. *蔬菜*, 2017(4): 16-21.
- [22] GAO Y, ZHU L, LING W. Application of the partition-limited model for plant uptake of organic chemicals from soil and water [J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 336(1-3): 171-182.
- [23] 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.
- [24] LU X, GAO Y, LUO J, et al. Interaction of veterinary antibiotic tetracyclines and copper on their fates in water and water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 280: 389-398.
- [25] HIJOSAVALSERO M, FINK G, SCHLÜSENER M P, et al. Re-

- moval of antibiotics from urban wastewater by constructed wetland optimization[J]. *Chemosphere*, 2011,83(5):713-719.
- [26] AZANU D, MORTEY C, DARKO G, et al. Uptake of antibiotics from irrigation water by plants[J]. *Chemosphere*, 2016,157:107-114.
- [27] MWM B. The use of antibiotic fermentation wastes as fertilizers for tomatoes[J]. *Journal of Agricultural Science*, 1979,92(3):669-674.
- [28] DONG H K, GUPTA S, ROSEN C, et al. Antibiotic uptake by vegetable crops from manure-applied soils[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2013,61(42):9992.
- [29] COLLINS C, FRYER M, GROSSO A. Plant uptake of non ionic organic chemicals [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006,40(1):45-52.
- [30] 陆琳,黎其万,严红梅,等. 水培条件下油白菜对 Pb、Cd 吸收和转运的影响[J]. *环境科学与技术*, 2012(S2):30-35.
- [31] 汤贝贝,张振华,卢信,等. 养殖废水中抗生素的植物修复研究进展[J]. *江苏农业学报*, 2017,33(1):224-232.
- [32] HU X, ZHOU Q, LUO Y. Occurrence and source analysis of typical veterinary antibiotics in manure, soil, vegetables and groundwater from organic vegetable bases, northern China[J]. *Environmental Pollution*, 2010,158(9):2992.
- [33] LI X, YU H, XU S, et al. Uptake of three sulfonamides from contaminated soil by pakchoi cabbage[J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2013,92(3):297-302.
- [34] CARY T C, GUANGYAO S A, MANES M. A partition-limited model for the plant uptake of organic contaminants from soil and water[J]. *Environmental Science & Technology*, 2001,35(7):1437-1444.

(责任编辑:张震林)