

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.19499

抗生素使用现状及其在生态环境系统的行为研究进展

王晓娟¹, 年夫照², 夏运生¹, 姜鑫宇², 刘瑞瑞², 赵宇霞², 宫锐璟²,
张永辉³, 王飞³, 夏春^{3*}, 王李芳³, 廖小琳⁴, 赵磊峰⁵

(1. 云南农业大学资源与环境学院, 云南 昆明 650201; 2. 云南农业大学烟草学院, 云南 昆明 650201;
3. 四川省烟草公司泸州市公司, 四川 泸州 646000; 4. 云南农业大学食品科技学院, 云南 昆明 650201;
5. 云南农业大学农学与生物技术学院, 云南 昆明 650201)

摘要: 阅览关于抗生素在生态环境中迁移转化降解等行为的文献, 文献内容有研究性和综述性。分析了解近些年对抗生素行为研究的重视情况、使用现状、研究种类, 对人体、土壤、水体还有植物体的污染情况、研究进展、研究方法、抗生素的降解处理等方法内容, 并列举代表性研究对内容进行阐述。总结了滥用抗生素对人体和生态环境的危害, 并对未来抗生素在生态环境的行为影响研究进行展望, 以期为后续抗生素在生态环境中的研究提供参考。

关键词: 抗生素; 生态环境; 污染; 迁移; 转化; 降解

1 抗生素的定义及其分类

抗生素 (Antibiotic) 是由某些微生物产生或者人工化学合成的, 能抑制微生物和其他细胞增殖的化学物质^[1-2], 例如医学上常用到的青霉素、罗红霉素等。

目前常用的抗生素有以下几类^[1-4]: 磺胺类抗生素 (SAs): 磺胺嘧啶、磺胺二甲氧嘧啶、磺胺甲基嘧啶、磺胺醋酰、甲磺灭脓等。四环素类抗生素 (TCs): 四环素、土霉素、金霉素、强力霉素、替加霉素及半合成衍生物二甲氨基四环素等。喹诺酮类抗生素 (FQs): 诺氟沙星、氧氟沙星、环丙沙星、沙拉沙星、洛美沙星、恩诺沙星等。大环内酯类 (MLs): 红霉素、阿奇霉素、罗红霉素、麦迪霉素、泰乐菌素、酒霉素等。氨基糖苷类抗生素: 庆大霉素、链霉素、卡那霉素、阿米卡星等。 β -内酰胺类抗生素: 头孢菌素、青霉素及其衍生物、阿莫西林、硫霉素类、单环类、头霉素类等。氯霉素类: 氯霉素、甲砒霉素等。

2 抗生素的应用

自 20 世纪 20 年代人类首次发现抗生素到现在, 成千上万的抗生素不断被发现, 因其对病菌具有杀灭或抑制的效果, 所以在人类医学上被广泛应用。在畜牧业可用来预防和治疗动物疾病, 也可加快动、植物的生长^[5]; 在农业上的应用主要是控制细菌、真菌对农作物的感染, 还可做杀虫和除草剂^[6]。

2.1 在人类医学上的应用

20 世纪 20 年代, 英国细菌学家亚历山大·弗莱明发现了世界上第一种抗生素—青霉素, 并发表论文《论青霉菌培养物的抗菌作用》。青霉素的诞生在第二次世界大战中拯救了无数受伤者的生命, 开启了用抗生素治疗疾病的新时代, 继青霉素之后, 科学家们对抗生素开始了大量的实验探索, 土霉素、金霉素、红霉素、卡那霉素等相继出世^[2]。抗生素主要用于医疗治病, 有免疫抑制作用, 它在生物体内可治疗细菌、支原体、螺旋体和微生物等感染引起的疾病和用于治疗肿瘤^[1-2]。因其高效、低毒、价格低、方便购买和临床应用广泛, 因此出现了抗生素滥用的现象。其负面效应也开始显现—细菌出现抗药性, 造成的后果就是疾病的治愈难度增加。乔博超等^[7]发现抗生素的滥用已使微生物对 257 种抗生素具有抗性现象, 抗生素抗性基因已经在土壤、水体和空气等多种环境介质

收稿日期: 2019-10-24; 录用日期: 2020-03-20

基金项目: 四川省烟草公司泸州市公司科技项目“烟叶安全性控制技术研究与应”和“泸州烟叶最佳产质量匹配度研究”。

作者简介: 王晓娟 (1993-), 女, 山西大同人, 在读硕士, 主要从事烟草栽培生理生化研究。E-mail: 357603734@qq.com。

通讯作者: 夏春, E-mail: 597212157@qq.com。

中被检测出来,抗性基因的大规模出现提醒人们需要思考和警惕,抗生素滥用导致的污染现象可能已超出了人们的想象。

2.2 在畜牧业上的应用

在畜牧业方面抗生素的使用主要分为两大部分,一是用于预防和治疗疾病,二是用于提高动物生产性能^[5]。抗生素使动物死亡率降低,肉的品质和产量相应也变得优质和增高,出于利益考虑,人们在畜牧业上使用抗生素也变得越来越频繁。有调查显示我国每年喹诺酮类抗生素的生产数量达到了700 t,超过一半是被使用在水产养殖上,这些抗生素20%对藻类存在毒性,50%对鱼类有毒性,有将近三分之一会被残留下来进入水体^[8],在环境中进行生态循环。畜牧业大量使用抗生素产生的负面影响也逐渐出现,例如畜体产生耐药菌、畜体疫苗接种作用被影响、畜体免疫力下降、畜体二重感染、畜体药物富集等^[9]。抗生素给畜牧业带来的有益之处是不可否认的,但是为了提高动物生产性能和获得更大的经济利益而对动物进行抗生素滥用产生的负面影响也是不可避免的,所以在畜牧业发展中应该限制抗生素在畜牧业的使用量或者尽量不使用。

2.3 在农业上的应用

我国有句谚语:国以民为本,民以食为天,食以安为先。自古以来我国都是农业大国,农业是人类生存的基本条件和国家经济发展的基础,抗生素在医学上的应用也启发了在农业中抗生素的应用,主要用于控制植物被细菌和真菌感染,调节植物生长以及杀虫和除草^[6]。农用抗生素主要品种有以下几类:防治细菌病害的:农用链霉素、土霉素、中生菌素、春雷霉素等;防治真菌病害:放线菌酮、春雷霉素、井冈霉素、多抗霉素、四霉素等;杀虫杀螨:阿维菌素、浏阳霉素、多杀菌素、杀蚜素等;除草:双丙氨膦、除草菌素、丁香霉素等;调节植物生长:赤霉素、放线菌酮^[6]。农业植物在生长中不可避免会有病害,抗生素的功能在植物生长中有着不可忽视的作用,因此在农业方面抗生素的使用量也是非常大的,但农用抗生素的施用会残留在植物表面以及土壤里^[6]。

3 进入生态环境中的抗生素

生态环境中抗生素的来源有两大类,即内源存在和外源输入,其中以外源输入为主^[7]。抗生素在

医用、兽用及农用方面都不是百分之百被吸收使用,最终会有一部分进入到生态环境中。医用抗生素直接随污水或人体排出进入污水处理厂;兽用抗生素进入水产养殖和畜牧行业,产生的底泥和粪便进行堆肥或进入垃圾填埋场;农用抗生素会在植物体内和土壤中富集,或随着农用水进入地表水和地下水^[10]。其中污水处理厂和垃圾填埋场并不会特意对抗生素进行处理,因此它们同农用抗生素一样进入土壤表层,随着雨水的淋洗行为进入深层土壤,在土壤中进行吸附、迁移和降解,再出现在土壤沉积物、地表水和地下水中,影响水生生物和人体健康,在生态环境中进行生态循环^[11]。随着现在人们对环保的重视,抗生素对环境的影响研究也越来越多,Sacher等^[12]调查环境中抗生素污染现状及危害,对德国108个地下水样进行分析,结果水样中有60种抗生素被检出,含量单位为 $\mu\text{g/L}$ 。李红燕等^[10]在我国湖北省、福建省以及瑞士格拉特山谷分水岭的溪流中均检出喹诺酮类抗生素。邵义萍^[13]在我国珠江三角洲土壤里也检出了喹诺酮类,还有磺胺类和四环素类抗生素。

3.1 土壤中抗生素的输入性来源和污染状况

土壤中抗生素的输入性来源有污泥农用化、灌溉水以及农业有机肥施用等^[10, 13-16]。首先,污水处理厂产生的污泥中含有抗生素,并且这些污泥回收大多用于农业上,所以污泥所带的抗生素会进入到土壤中^[10, 14]。其次,地表灌溉水和地下水的抗生素污染可通过淋洗行为进行相互作用,在这个相互作用过程中水中的抗生素又可通过沉积富集而残留在土壤中^[10]。再者,就是有机肥的施用,马驿等^[15]的研究中发现鸡粪、猪粪和牛粪的抗生素总浓度在10 mg/kg左右,肥料施在土壤里,抗生素也就进入了土壤。对不施用和施用了有机肥的土壤进行研究对比,发现不施用有机肥的土壤抗生素含量单位在 $\mu\text{g/kg}$,而施用有机肥的土壤抗生素含量单位可达到 mg/kg ^[16]。如此大的单位差别不仅说明了土壤中有残留抗生素,且农用抗生素的残留量在土壤中可广泛检出。

3.1.1 土壤中抗生素的吸附迁移

影响抗生素在土壤中吸附迁移行为的因素有很多,如土壤质地、土壤pH、土壤微生物、土壤中的胶体粒子、土壤有机质、水淋洗行为等^[11, 17-20]。王畅等^[17]对氧氟沙星、诺氟沙星在紫色土中的吸附进行研究,发现二者物理吸附较快,土壤pH会

影响抗生素的吸附过程。章明奎等^[18]选用7个农业土样(长江三角洲和珠江三角洲典型农业土壤,5个稻田土样和2个旱地土样),质地为砂土、粘土和壤土,用室内模拟方法研究泰乐菌素和土霉素的吸附与迁移,结果表明土霉素吸附能力比泰乐菌素高,两种抗生素在黏土里较为稳定,而泰乐菌素在砂土易迁移^[18]。邵珍珍等^[19]以二氧化硅胶体作为外源胶体,分析磺胺嘧啶在土壤中吸附迁移行为,结果显示低离子强度二氧化硅胶体的加入促进磺胺嘧啶的迁移。汪仙仙等^[20]通过室内土柱淋溶实验研究磺胺甲基嘧啶,磺胺二甲基嘧啶和甲氧苄啶在稻田土中的纵向迁移,发现在酸雨作用下3种抗生素易在土壤中吸附,且纵向迁移能力增强,这个结果说明自然现象(酸雨淋洗)会影响土壤中抗生素的行为,不仅表现在地表,还增加了向地下水迁移的风险。这几项研究也表明了不同品种抗生素在不同的土壤质地和环境里,因影响因素不同,其吸附迁移行为各不相同。

3.1.2 土壤中抗生素的降解

目前发现的土壤中抗生素降解方式有微生物降解、化学降解、光化学降解、高温堆肥等^[11, 21-22]。邱美珍等^[21]总结了畜禽粪污中抗生素降解方法,有高温堆肥、厌氧消化、植物修复和高级氧化法。高温堆肥对四环素类抗生素降解率是四环素>金霉素>土霉素,通过对牛粪堆肥实验研究土霉素的降解,发现高温堆肥63d后其降解率达到96.7%^[23-24]。王强峰等^[25]从重金属污染土壤中选出能降解抗生素的轮状镰刀菌、腐皮镰刀菌、薇紫青霉和聚多曲霉,发现随着抗生素浓度增加菌株对不同抗生素降解能力有不同的削弱。微生物降解方法有活性污泥法、堆肥法、膜生物反应、超声法^[26]。在猪粪中加外源微生物对四环素类降解率为金霉素>土霉素>四环素,还有人工湿地法(人工湿地耦合微生物燃料电池)也可对土壤中的抗生素进行降解^[26]。生态环境有一定的自净能力,但因各种人为或自然的局限性,残留抗生素并不会短时间内降解消失,更多的降解方式还需进一步探讨。

3.1.3 土壤中抗生素的去除方法

有研究采用生物炭对4种抗生素进行去除,结果表明生物炭可降低土中有效态抗生素含量,减少蔬菜吸收土壤中抗生素,还可增加蔬菜的生物量,玉米秸秆生物炭能对含金霉素的溶液吸附并且解析率较低,在土壤中加入氨基酸肥和活性炭来去

除复合抗生素,去除效果明显^[27-29]。生物炭是含碳量极高的生物质,在缺氧或限氧条件下经高温裂解(通常 $\leq 700^{\circ}\text{C}$)产生的高度炭化多孔物质,能有效地控制抗生素在生态环境中的行为^[30],原材料有农作物秸秆、畜禽排泄物、生活污水、生活垃圾等^[31],是一种利用有机废弃物为原料的环保能源。添加生物炭后,土壤中的微生物得到了足够的碳源,生长量显著增加,加速了抗生素的生物降解^[30]。虽然生物炭的原料是有机废弃物,但其本身抗生素残留可忽略不计甚至100%去除,田仁强等^[32]研究表明含有4种兽用抗生素的鸡粪,与农林废弃物通过共热解制成生物炭后抗生素的去除率达到100%,曹志洪^[31]研究表明,鸡粪在 400°C 中温下烧制的生物炭可去除大多数抗生素抗性基因,到 600°C 以上可完全消除。多项研究显示目前对抗生素最有效的去除方法之一是使用生物炭,近些年生物炭的应用越来越多,在生态环境保护方面有广阔的应用前景。

3.2 水体中的抗生素的输入性来源和污染状况

由于抗生素具有亲水性,极易残留在适应性强的水环境中。雷小阳等^[33]分析了水体抗生素污染来源为自然来源和人为来源,自然来源为植物所释放的雌激素等(影响极低);人为排放源有工业排放、农业排放、医用排放、污水处理厂以及垃圾处理渗滤液等,其污染状况在接收污水的地表水体最严重。有研究者调查了我国江汉平原、北江流域及美国中部的欧扎克高地地区内大环内酯类、四环素类、氟喹诺酮类及磺胺类的迁移残留,发现最高残留出现在人类生活区^[34-35],说明地表水中抗生素主要来源为该地区人类生活污水排放,地表污水的渗透输入及其他综合作用从而污染到地下水。

3.2.1 水体中抗生素的吸附

与土壤中抗生素的吸附迁移相比,水中情况要相对复杂些,例如湖底底泥也可对抗生素进行吸附^[36]。沈晓珊^[37]研究了多孔芳香骨架材料对水中四环素和盐酸强力霉素的治理,结果显示有吸附效果。崔颖等^[38]研究了铝基MOF材料对氟喹诺酮和磺胺类抗生素的吸附,在淡水、河水和海水中的低浓度抗生素吸附率达90%以上。因为水的流动性和抗生素的亲水性,抗生素在水中是不易沉积的,所以其吸附迁移行为受到的影响要比土壤复杂的多,如水质pH、水温、水体微生物、藻类、水体有机质和无机质、水的自净能力^[36-38],这些因

素都会对水体中抗生素的吸附产生影响。

3.2.2 水体中抗生素的降解

申彦茹^[39]研究发现钙离子和腐殖酸可加快水体中链霉素的降解,铜离子和镉离子则会出现抑制现象,研究还发现微生物是影响水中链霉素降解的主要因素。谭若兰等^[40]研究了吸附法、生物法、高级氧化技术对水体中硝基咪唑类抗生素的降解,发现单一方法效果并不显著,还应多种方法结合。该方法类似污水处理,经过很多道工序,首先经过格栅拦截大体积固废,而后是物理与化学处理,抗生素在水中的残留就是一种污染物质,同其他污染物一样,并不是单一方法就可进行降解,所以可将各研究的降解方法联合,选择有效的、性价比高的方法,组成新的降解流程。

3.2.3 水体中抗生素的去除方法

相比于土壤,水环境中抗生素的去除研究相对较多,金磊等^[41]在水中微量抗生素去除方法中提到了电絮凝-气浮分离、超滤膜、活性炭吸附、纳滤、紫外消毒和氯消毒加起来的集成工艺,对抗生素的去除率可达94.9%~100%,但是这个方法过于复杂,只适合微量抗生素的去除。黄苑强等^[42]总结抗生素去除方法有生物处理(活性污泥法、厌氧生物处理、人工湿地和土壤渗滤处理系统)、絮凝与吸附(絮凝、活性炭吸附)、过滤(砂滤、膜过滤、河岸过滤)、高级氧化处理(臭氧、紫外线、低温等离子体技术、电解氧化法)。与土壤抗生素去除效果一样,单一方法并不能达到最大效果,需多种方法结合。徐武军等^[43]综述了臭氧氧化技术处理废水中的6种抗生素(大环内酯类、磺胺类、四环素类、喹诺酮类、氯霉素、 β -内酰胺类)去除效果极好,反应速率快且无再次污染,运用臭氧、活性炭、紫外线等方法有局限性,目前在国内市场紫外线灯价格还普遍偏高,在大型市政污水处理厂才会配有紫外消毒,所以以上的去除方式依旧只适合小范围微量抗生素的去除。

4 植物中抗生素研究

4.1 抗生素在植物体内的吸收累积和迁移分布

如果抗生素在环境中未被去除就会进入到植物体内^[44-48]。有学者在珠三角某施用粪肥蔬菜基地取样,测了磺胺类、喹诺酮类和四环素类在9种蔬菜中的含量,3种抗生素总含量在大白菜中最多,恩

诺沙星在萝卜中含量最多,环丙沙星在生菜中含量最多,抗生素浓度越高在小白菜体内累积就越多(土壤pH=5时累积量最多)^[44-45]。贺德春等^[46]采用盆栽实验研究小白菜和白萝卜对四环素类抗生素的吸收累积,两种蔬菜都有吸收累积,小白菜富集能力>白萝卜的富集能力。以上研究涉及到多种蔬菜及抗生素,在同一种蔬菜里不同抗生素残留量不同,同一种抗生素在不同蔬菜里残留量也不同。鲍陈燕等^[47]研究水培条件下水芹抗生素累积量:恩诺沙星>土霉素,器官中抗生素累积根>叶和茎。孙勤寓等^[48]研究广东湛江红树林自然保护区湿地中两种红树林(红海榄和白骨壤)中环丙沙星的迁移特征,结果发现两种红树林里环丙沙星的残留量都很高,累积量白骨壤>红海榄,地上部分残留量>地下部分残留量。在水芹中,地下部分抗生素累积量高于地上部分,而红树林则是地上部高于地下部,由此可见在不同的土壤、pH、植物体及其器官,不同的抗生素种类和不同环境条件下,抗生素在植物体内的迁移累积各不相同,甚至出现很大的差异。

4.2 抗生素对植物生理生化指标的影响

朱秀辉等^[49]研究四环素类对白菜种子的影响,结果表明,3种抗生素浓度低于5 mg/L时,对白菜根伸长有明显抑制作用,对白菜种子的抑制排序为金霉素>四环素>土霉素,但是当3种抗生素浓度低于2 mg/L时,出现了促进芽生长的现象,其中土霉素影响最大。4 mg/L四环素能促进小白菜根和芽伸长,高于这个浓度则会抑制,不同浓度的环丙沙星也会抑制其种子萌发,环丙沙星对小白菜生态毒性大于四环素,且浓度越高越明显,还会提高小白菜耐药内生细菌比例^[50]。这样的结果说明低浓度抗生素对植物有一定的促进作用,高浓度则会有抑制现象。熊华焯等^[51]研究了土霉素加菌剂对玉米生理影响,玉米的根长易受土霉素影响,还会抑制玉米的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率。姚建华等^[52]研究土霉素对小麦的影响,选对土霉素敏感与不敏感两种小麦根部,对根中的土壤脲酶、磷酸酶、蔗糖酶、过氧化氢酶和微生物量进行加土霉素对比试验,结果表明土霉素对小麦根部影响存在基因性差异,酶活性不敏感品种比敏感品种弱。以上几项研究里,虽然抗生素和植物种类都不同,但结果一致显示抗生素对植物生理生化是有一定影响的。

5 抗生素的现实危害

多重耐药性细菌又称超级细菌,指广泛使用抗生素使细菌产生了耐药性导致细菌基因突变,形成新的更多的耐药细菌,目前发现的超级细菌有:耐甲氧西林金黄色葡萄球菌(MRSA)、耐多药肺炎链球菌(MDRSP)、万古霉素肠球菌(VRE)、多重耐药性结核杆菌(MDR-TB)、多重耐药鲍曼不动杆菌(MRAB)、携带有NDM-1基因的大肠埃希菌和肺炎克雷伯菌等^[53]。抗生素已经无法对这些超级细菌进行杀灭。抗生素的易购买,杀菌效果好等优点使人们在病状轻的时候也选择服用,这样的现象不仅造成药物浪费,而且长期大量的服用可能会导致变态反应。如过敏性休克、轻微皮疹、造血系统抑制、损害神经系统、周围神经系统病变以及神经肌肉传导阻滞等^[54]。医学上抗生素滥用的结果可能会同样出现在畜牧业和农业上,近几年频繁出现的禽流感、猪瘟等,是否与抗生素滥用有直接关系,还有待相关科研机构深入研究。

6 抗生素在生态环境系统的行为研究总结与展望

目前学者们对抗生素在生态环境方面的研究越来越多,水体、土壤和植物都已有初步的研究,如抗生素在环境中的检出量、迁移状况以及降解去除等。现有的研究内容也有一些不足之处,首先,研究大多是在实验室进行并且以植物研究居多,抗生素种类选取和添加都是人为操作,建议研究方向从实地取样扩展,虽然操作耗时耗力,复杂困难,但是可以更加清晰地探索抗生素在生态环境残留的现状。其次,抗生素在生态环境中的残留是否百害而无一利,并无研究可以明确地论证这个结果,前面研究内容证明适度的抗生素浓度可以促进植物生长,植物的抗病性和农艺性状都表现很好,而过度使用抗生素会抑制植物生长甚至导致植物死亡,建议从这个角度出发结合实际情况,探讨目前生态环境中抗生素的残留影响到底有多大,具体会影响哪些方面,是否存在对生态环境有益的一面。笔者认为未来新的研究方向可以根据整个环境来制定,前面提到土霉素在黏土中不易迁移,而水芹对土霉素的吸附累积较少,在被土霉素污染的黏土中种植水芹,这样既可种植农作物,又可减少作物吸收抗生素。污水处理厂会对剩余污泥进行堆肥处理,本文抗生素降解部分提到抗生素可通过高温堆肥进行降

解,那么,在污水处理厂堆肥这个阶段可以再加些步骤使抗生素降解,达到减小城市排泄产生的抗生素进入生态环境的目的。

十九大报告提出“绿水青山就是金山银山”的自然发展理念,保护资源和我们赖以生存的环境越来越被重视,用损害自然资源去换取经济的飞速发展已经不是我们所认同的最好途径,人们越来越注重健康安全和“绿色”的高生活质量。抗生素,以拯救生命的“身份”出现到如今,同其他资源一样,一旦超出了正确的使用范围将会对整个生态环境产生威胁。开拓思维争取将不利转化为有利,从无害化、减量化、资源化方向探索简单、方便、安全、环保的抗生素去除方法。希望对抗生素在生态环境的行为进行深度研究,以便发现抗生素对环境是否有更大的危害,同时也应制定相应国家标准为生态环境保护做保障。

参考文献:

- [1] 王润玲. 药物化学[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2014.
- [2] 闵犁园, 谭艳霞, 叶文淳. 药物化学[M]. 昆明: 云南大学出版社, 2012.
- [3] 孙永波. 烤烟幼苗体内两种喹诺酮类抗生素分析方法的建立及累积分布特征研究[D]. 昆明: 云南农业大学, 2017.
- [4] 刘书武. 土霉素与金霉素在烟苗内的分布、累积及对其生长的影响[D]. 昆明: 云南农业大学, 2017.
- [5] 陈永山, 章海波, 骆永明, 等. 典型规模化养猪场废水中兽用抗生素污染特征与去除效率研究[J]. 环境科学学报, 2010, 30(11): 2205-2212.
- [6] 任兴超. 农用抗生素类型及在现代农业生产中的应用[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(17): 5465-5466, 5544.
- [7] 乔博超, 吴楠, 杨静慧, 等. 环境中抗生素抗性基因的来源、分布及控制对策[J]. 天津农林科技, 2017(6): 16-18.
- [8] 曾庆军. 抗生素在生态环境中的污染转归以及应对措施[J]. 湖南畜牧兽医, 2017(5): 49-52.
- [9] 丁颀瑛. 抗生素使用对畜牧业的影响及应对思路[J]. 传播力研究, 2019(21): 214-215.
- [10] 李红燕, 陈兴汉. 环境中抗生素的污染现状及危害[J]. 中国资源综合利用, 2018(5): 82-95.
- [11] 赵方凯, 杨磊, 乔敏, 等. 土壤中抗生素的环境行为及分布特征研究进展[J]. 土壤, 2017, 49(3): 428-436.
- [12] Sacher F, Lange F T, Brauch H. Pharmaceuticals in ground water analytical methods and result of a monitoring program in Baden-wuttemberg, Germany[J]. Journal of Chromatography A, 2001, 938(1): 199-210.
- [13] 邵义萍. 珠三角地区蔬菜基地土壤中典型抗生素的污染特征研究[D]. 广州: 暨南大学, 2010.

- [14] 邵一如. 污水处理厂中抗生素分布及影响效应研究 [D]. 保定: 河北农业大学, 2013.
- [15] 马驿, 陈杖榴. 恩诺沙星对土壤微生物群落代谢功能多样性的影响 [J]. 生态毒理学报, 2010, 5 (3): 446-452.
- [16] 周启星, 罗义, 王美娥. 抗生素的环境残留、生态毒性及抗性基因污染 [J]. 生态毒理学报, 2007, 2 (3): 243-251.
- [17] 王畅, 李余杰, 张智, 等. 氟喹诺酮类抗生素在农业紫色土中的吸附研究 [J]. 土壤, 2018, 50 (5): 958-964.
- [18] 章明奎, 王丽平, 郑顺安. 两种外源抗生素在农业土壤中的吸附与迁移特性 [J]. 生态学报, 2008, 28 (2): 761-766.
- [19] 邵珍珍, 林青, 徐绍辉. 不同离子强度下 SiO₂ 胶体对磺胺嘧啶土壤吸附迁移行为的影响 [J]. 土壤学报, 2018, 55 (2): 411-421.
- [20] 汪仙仙, 张洪昌, 沈根祥, 等. 典型磺胺类抗生素在稻田土中的纵向迁移 [J]. 环境化学, 2018, 37 (8): 1746-1754.
- [21] 邱美珍, 谢菊兰, 任慧波, 等. 畜禽粪污中残留抗生素降解方法进展 [J]. 激光生物学报, 2018, 27 (4): 308-312.
- [22] 陈小丽, 魏金华, 蔺中, 等. 抗生素的微生物降解研究进展 [J]. 现代农业科技, 2018 (16): 167-168.
- [23] 张树清, 张夫道, 刘秀梅, 等. 高温堆肥对畜禽粪中抗生素降解和重金属钝化的作用 [J]. 中国农业科学, 2006, 39 (2): 337-343.
- [24] 熊志强, 霍朝晨, 张炜然, 等. 牛粪堆肥过程中土霉素降解及其与微生物群落结构的关系 [J]. 土壤与作物, 2018, 7 (2): 111-119.
- [25] 王强锋, 朱彭玲, 夏中梅, 等. 三种农用抗生素降解真菌的筛选及其降解性能 [J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35 (6): 533-539.
- [26] 郑茂佳, 张恩栋, 孙静茹, 等. 四环素类抗生素生物降解研究进展 [J]. 天津农业科学, 2018, 24 (6): 72-76, 85.
- [27] 杨永青, 许继飞, 董泰音, 等. 水体和土壤环境中抗生素抗性基因 (ARGs) 的污染特征和消除 [J]. 北方农业学报, 2018, 46 (3): 76-82.
- [28] 关连珠, 赵亚平, 张广才, 等. 玉米秸秆生物炭对外源金霉素的吸持与解吸 [J]. 中国农业科学, 2012, 45 (24): 5057-5064.
- [29] 赵立春, 孔德玉, 李明, 等. 可修复被抗生素污染土壤的功能性肥料研究 [J]. 农业与技术, 2017, 37 (13): 18-19.
- [30] 钟金魁, 李柳, 钟志为, 等. 生物炭对抗生素环境行为的影响研究进展 [J]. 安全与环境学报, 2018 (2): 657-663.
- [31] 曹志洪. 生物炭与污染土壤修复及烟草行业的研发进展 [J]. 中国烟草学报, 2019, 25 (3): 1-12.
- [32] 田仁强, 谢胜禹, 李春星, 等. 鸡粪与农林废弃物共热解对生物炭中残留重金属和抗生素的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2019, 38 (11): 2619-2631.
- [33] 雷小阳, 倪雯倩, 陈新涛, 等. 水中新型污染物及其检测技术研究进展 [J]. 广东化工, 2018, 45 (13): 191-193.
- [34] 姚琳琳. 水环境中抗生素的分布、归趋与危害研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2017.
- [35] 蒋吴余, 张孟迪, 周仁钧, 等. 北江流域抗生素污染水平和来源初探 [J]. 生态毒理学报, 2015, 10 (5): 132-140.
- [36] 陈琼, 丁惠君, 张维昊, 等. 滨湖底泥对 2 种喹诺酮类抗生素的吸附作用研究 [J]. 环境科学与技术, 2019, 42 (6): 106-114.
- [37] 沈晓珊. 多孔芳香骨架材料的极性调控及其对水中抗生素的吸附与分离研究 [D]. 长春: 东北师范大学, 2019.
- [38] 崔颖, 孙国峰, 任苏瑜. 锆基 MOF 材料用于水中抗生素的吸附研究 [J]. 环境科学与技术, 2019, 42 (3): 103-108.
- [39] 申彦茹. 链霉素在水环境中的降解 [D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2016.
- [40] 谭若兰, 吕中建, 唐镜, 等. 水环境中硝基咪唑残留的降解方法研究 [J]. 广州化工, 2019, 47 (7): 81-83.
- [41] 金磊, 胡涛. 水源水中微量抗生素的去除工艺 [J]. 净水技术, 2018, 37 (S2): 24-28.
- [42] 黄苑强, 陈钰, 秦雄, 等. 环境中残留药物的污染及其治理 [J]. 广州化工, 2019, 47 (4): 105-153.
- [43] 徐武军, 张国臣, 郑明霞, 等. 臭氧氧化技术处理含抗生素废水 [J]. 化学进展, 2010, 22 (5): 1003-1009.
- [44] 吴小莲, 向垒, 莫测辉, 等. 长期施用粪肥蔬菜基地蔬菜中典型抗生素的污染特征 [J]. 环境科学, 2013, 34 (6): 2442-2447.
- [45] 段晓洁. 喹诺酮类抗生素在蔬菜体内迁移和积累的研究 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2012.
- [46] 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 [C]// 中国环境科学学会学术年会论文集. 北京: 中国环境科学学会, 2017. 2063-2068.
- [47] 鲍陈燕, 顾国平, 章明奎. 兽用抗生素胁迫对水芹生长及其抗生素积累的影响 [J]. 土壤通报, 2016, 47 (1): 164-172.
- [48] 孙勤寓, 彭逸生, 刘玉, 等. 抗生素环丙沙星 (CIP) 在两种红树林湿地中的残留及迁移特征 [J]. 环境科学学报, 2017, 37 (7): 1057-1064.
- [49] 朱秀辉, 丁丹, 茹淑玲, 等. Ca²⁺ 和四环素类抗生素单体、复合溶液及土壤解吸液对白菜种子萌发和根芽伸长的影响 [J]. 江苏农业科学, 2018, 46 (17): 141-144.
- [50] 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.
- [51] 熊华焯, 秦俊梅, 马浩天. 含土霉素土壤添加不同基质后对玉米生理特性的影响 [J]. 水土保持学报, 2018, 32 (2): 283-289.
- [52] 姚建华, 牛德奎, 李兆君, 等. 抗生素土霉素对小麦根际土壤酶活性和微生物生物量的影响 [J]. 中国农业科学, 2010, 43 (4): 721-728.
- [53] 刘丹华, 张晓伟, 张翀. 抗生素滥用与超级细菌 [J]. 国外医药抗生素分册, 2019, 40 (1): 1-4.
- [54] 段晓丹. 滥用抗生素的危害及科学使用抗生素 [J]. 当代医学, 2012, 18 (24): 19-20.

Current status of antibiotic use and its behavior in ecological system

WANG Xiao-juan¹, NIAN Fu-zhao², XIA Yun-sheng¹, JIANG Xin-yu², LIU Rui-ru², ZHAO Yu-xia², GONG Rui-jing², ZHANG Yong-hui³, WANG Fei³, XIA Chun^{3*}, WANG Li-fang³, LIAO Xiao-lin⁴, ZHAO Lei-feng⁵
(1. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming Yunnan 650201; 2. College of Tobacco, Yunnan Agricultural University, Kunming Yunnan 650201; 3. Sichuan Tobacco Company Luzhou Company, Luzhou Sichuan 646000; 4. College of Food Science and Technology, Yunnan Agricultural University, Kunming Yunnan 650201; 5. College of Agriculture and Biotechnology, Yunnan Agricultural University, Kunming Yunnan 650201)

Abstract: The literatures on the migration, transformation and degradation of antibiotics in the ecological environment were reviewed in this paper. Analyze and understand the emphasis on antibiotic behavior research in recent years, the current situation of its use, the types of research, and its pollution to human, soil, water and plant, research progress, research methods, antibiotic degradation treatment methods, etc. , and representative studies were listed to elaborate the contents. The harm of abuse of antibiotics to the human and the ecological environment was summarized, and the future research on the behavior of antibiotics in the ecological environment was looked forward in order to provide a reference for the further antibiotics study.

Key words: antibiotics; ecological environment; pollution; migration; transformation; degradation