

## 残膜对土壤和作物的影响及防治对策

董灵艳, 袁海涛\* (德州市农业科学研究院, 山东德州 253015)

**摘要** 针对近几十年我国农用地膜的使用以及产生的污染问题, 结合历年发表的文献对残膜对土壤理化性质、土壤微生物、作物生长发育的影响和残膜污染状况进行了概述, 并从国家政策和科学研究方面对污染防治对策进行了阐述, 为以后残膜污染的防治和地膜合理利用提供参考依据, 使地膜生产者和使用者的土壤保护意识进一步加强。

**关键词** 残膜; 土壤性质; 污染; 治理; 地膜回收; 降解地膜

中图分类号 X53 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2020)09-0020-03

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.09.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Effects of Residual Films on Soil and Crops and Control Countermeasures

DONG Ling-yan, YUAN Hai-tao (Dezhou Academy of Agricultural Sciences, Dezhou, Shandong 253015)

**Abstract** In view of the use and pollution problems of agricultural mulch film in China in recent decades, combined with the literature published over the years, the effects of mulch film on soil physical and chemical properties, soil microorganisms, crop growth and development, and the pollution situation of mulch film were summarized, and the pollution control strategies from national policies and scientific research were expounded from the aspects of national policy and scientific research, which provide a reference basis for the prevention and control of residual film pollution and the rational use of mulch film, and further strengthen soil protection awareness of mulch producers and users.

**Key words** Residual film; Soil properties; Pollution; Control; Mulch film recovery; Degradable mulch film

地膜作为我国第四大农业生产资料, 具有提高作物生长前中期的土壤温度、提高水分利用率、减少土壤无效蒸发、防止土壤板结、抑制土壤盐分上移、促进作物生长和提高农业经济效益等作用, 对保障我国粮食安全具有重要意义<sup>[1-4]</sup>。中国是世界上农膜大国, 已成为世界上最大的农膜生产国和使用国<sup>[5]</sup>, 覆盖面积之大、覆盖作物种类之多, 同时又是地膜残留严重的国家。地膜在自然条件下难以降解, 且被不合理利用, 导致大量残膜留在土壤中, 且逐年积累<sup>[6]</sup>, 严重影响土壤质量, 对我国土壤可持续利用造成严重挑战。随着国家对残膜污染的重视, 笔者结合几十年来特别是近 10 年地膜方面的研究论文, 归类总结了残膜对土壤理化性质、土壤微生物、作物生长和产量 3 个方面的影响, 以及农膜使用状况和污染状况, 并从地膜回收和可降解地膜的研发应用两方面阐述了防治对策, 为加强土壤保护意识和减少地膜污染提供参考依据。

## 1 残膜对土壤理化性质的影响

**1.1 对土壤物理性质的影响** 地膜作为难降解的材料, 其对土壤物理性质的研究已有很多。杜利等<sup>[7]</sup>研究发现残膜量在 0~720 kg/hm<sup>2</sup>, 残膜处理比无膜处理的土壤容重有所增加, 土壤孔隙度有所降低, 且随残膜量和土层深度的增加, 土壤容重越大, 土壤孔隙度越小; 随残膜量的增加, 土壤含水量呈下降趋势。说明残膜阻碍土壤水分下渗并降低了土壤的通透性和导热性。常芳红<sup>[8]</sup>研究得出, 当残膜密度大于 900 kg/hm<sup>2</sup> 时, 残膜开始阻止水分下渗, 使得下层土壤中含水率明显降低。邹小阳等<sup>[9]</sup>研究表明, 残膜延长了土壤水分入渗时间, 入渗至 45 cm 土层深度时入渗历时随残膜量增加

而增大, 并且随残膜量增加, 作物适宜生长区和水分分布重心逐渐上移。解红娥等<sup>[10]</sup>研究表明, 残膜各处理的土壤容重均高于对照, 残膜量在 0~1 440 kg/hm<sup>2</sup> 时, 地膜残留量与土壤容重呈对数相关关系; 当残留量达 360 kg/hm<sup>2</sup> 以上时, 明显影响水分的上下移动速度, 水分下渗速度和上移速度均随着残膜量的增加呈对数递减。牛文全等<sup>[11]</sup>研究指出, 土壤中残膜对土壤水分入渗和蒸发均存在阻滞作用, 当残膜量 ≥80 kg/hm<sup>2</sup> 时, 湿润锋运移速率大幅下降; 残膜破坏了土壤水分分布的均衡性, 加剧了土壤水分垂直的变异性, 当残量 ≥320 kg/hm<sup>2</sup> 时会出现表土层板结现象。邹小阳等<sup>[12]</sup>研究得出, 不同残膜量能够降低水平湿润锋运移速率, 当残膜量超过 160 kg/hm<sup>2</sup> 时, 水平湿润锋运移速率和累积入渗量均大幅降低。

大量的研究表明, 残膜主要影响土壤耕作层, 减少了土壤水分入渗量, 降低土壤比热容, 使土壤降温加快, 削弱土壤抗旱能力; 残膜会破坏土壤结构, 增大地下水下渗难度, 引起土壤次生盐渍化和造成土壤板结, 严重污染土壤环境<sup>[13-17]</sup>。

**1.2 对土壤化学性质的影响** 目前, 关于残膜自然分解产生的有害物质对土壤化学性质的影响尚缺少长期监测<sup>[18]</sup>。解红娥等<sup>[10]</sup>对覆膜 5 年以上的地块的土壤有机质及大量、微量元素进行了测定, 结果表明, 土壤中的 N、P、Fe、Zn 的含量略有上升, Cu、Ni、Hg 的含量呈下降趋势, 土壤有机质变化不大。于立红等<sup>[19]</sup>通过盆栽和大田试验, 发现土壤中重金属质量分数随残膜量增加呈显著上升趋势, 高残膜量土壤的重金属质量分数明显高于低残膜土壤, 土壤中 Cd 的质量分数均超标。常芳红<sup>[8]</sup>研究表明, 随着残膜密度的增大, 土壤中水解氮、速效磷、速效钾和有机质均有所下降, 而土壤 pH 呈上升趋势。张丹等<sup>[20]</sup>研究表明, 残膜长期残留在土壤中会降低土壤有机质、全氮、铵态氮、硝态氮以及有效磷含量, 引起土壤养分退化。祖米来提·吐尔干等<sup>[21]</sup>研究表明, 随着

基金项目 公益性行业(农业)科研专项经费(201503105)。

作者简介 董灵艳(1984—), 女, 山东德州人, 农艺师, 硕士, 从事作物育种和栽培研究。\* 通信作者, 高级农艺师, 从事农田残膜污染研究。

收稿日期 2019-11-05; 修回日期 2019-11-26

残膜量的增加,土壤中硝态氮和铵态氮的含量增加,降低了植株氮素的吸收量,造成生物量下降,产量降低。董合干等<sup>[22]</sup>研究新疆棉田残膜时发现,残膜使土壤 pH 显著上升,有机质、碱解氮、速效磷和速效钾显著下降,在 2 000 kg/hm<sup>2</sup> 残膜密度下,碱解氮和有效磷分别下降了 55.0% 和 60.3%。由此可见,残膜对土壤化学性质的影响是显而易见的。

## 2 残膜对土壤微生物的影响

残膜强度对土壤微生物的影响报道较少。张丹等<sup>[20]</sup>研究表明,农田土壤中低量残膜可通过保水作用提高土壤微生物活性及其丰富度,而当残膜强度超过 450 kg/hm<sup>2</sup> 时,土壤微生物量、微生物群落丰度和土壤酶活性显著降低。蒋金凤等<sup>[23]</sup>分析表明,残留农膜会抑制土壤微生物的活动,使迟效性养分转化率降低,影响施入土壤的有机肥养分的分解和释放,降低肥效。邹小阳等<sup>[18]</sup>研究指出,残膜会破坏土壤空气循环过程,影响土壤微生物的生理活动。Mumtaz 等<sup>[24]</sup>研究认为残膜会阻隔土壤空气的流通通道,使 CO<sub>2</sub> 体积分数上升,恶化微生物和蚯蚓等昆虫的生存环境。残膜对土壤微生物的影响还需进一步深入研究。

## 3 残膜对作物生长及产量的影响

由于地膜残留对土壤理化性质和微生物的影响,地膜残留对作物生长发育的影响是不言而喻的,大量的研究结果也说明这一点。辛静静等<sup>[25]</sup>研究得出,残膜降低玉米出苗率,降低玉米生育前期的株高和叶面积指数,当土壤地膜残留量达 360 kg/hm<sup>2</sup> 时,玉米显著减产达 12.4%。耿智广等<sup>[26]</sup>研究得出,残膜量为 360 和 540 kg/hm<sup>2</sup> 时对玉米和胡麻出苗率的抑制作用最大,残膜量为 720 kg/hm<sup>2</sup> 时显著降低玉米和胡麻的干物质。李元桥等<sup>[27]</sup>研究发现,苗期玉米株高和叶面积在 90 kg/hm<sup>2</sup> 残膜梯度下开始显著降低,而对棉花的影响不显著,超过 180 kg/hm<sup>2</sup> 残膜会对作物根系的生长造成阻碍作用,直根系作物比须根系作物更能适应残膜胁迫。董合干等<sup>[22]</sup>研究表明,当残膜密度为 1 000 kg/hm<sup>2</sup> 时,棉花品种新陆早 33 号和新陆早 13 号产量分别下降 18.1%、13.5%,培育、应用发达根系的棉花品种可以一定程度上缓解地膜残留对产量的影响。

## 4 我国农田残膜污染状况及治理

### 4.1 我国农田地膜利用及污染状况

我国自 20 世纪 70 年代末引入地膜覆盖技术以来,实现了农作物大幅度增产增收。过去的几十年,地膜逐步得到大规模普及应用,最初应用于北方干旱、半干旱和南方的高寒冷凉地区,扩展到西北绿洲农业区、黄土高原旱作区、华北平原丘陵区、东北风沙旱区和西南武陵山区,现全国所有省(市、区)均已覆盖;应用作物最初主要用于经济价值较高的蔬菜、花卉,现已扩大到多种经济作物和大宗粮食作物上<sup>[28-29]</sup>。1982 年我国地膜使用量仅为 0.6 万 t,农作物覆盖面积仅为 11.7 万 hm<sup>2</sup><sup>[28]</sup>。2017 年,我国地膜使用量 143.7 万 t,地膜覆盖面积 1 865.7 千 hm<sup>2</sup>,其中地膜覆盖面积排在前三位的地区是新疆、山东省、甘肃省<sup>[30]</sup>。35 年间,我国地膜使用量增长近 240 倍,覆盖面积增长近 160 倍。

随着地膜投入量和使用年限的不断增加,以及农民使用过程中重使用、轻回收,大量地膜碎片残留于土壤中,严重影响土壤质量和污染土壤环境。当前我国耕地土壤地膜平均残留量为 60 kg/hm<sup>2</sup><sup>[31]</sup>。西北干旱绿洲区是我国农膜使用量最大的区域,覆膜农田平均地膜残留量达 231.0 kg/hm<sup>2</sup>,西北黄土旱塬区、东北风沙旱作区农田的地膜残留量在 100 kg/hm<sup>2</sup> 左右,华北以及西南种植区污染程度较轻,平均地膜残留量在 50 kg/hm<sup>2</sup> 以下<sup>[32]</sup>。

国家标准《农田地膜残留量限值及测定》于 2010 年发布,并于 2011 年实施,该标准明确规定,待播农田耕作层(25~30 cm)内地膜残留量限值应不大于 75.0 kg/hm<sup>2</sup>。根据这一标准,有关研究人员于 2011—2014 年对河南、河北、山东等地均通过问卷调查及取样检测方法对典型覆膜作物地膜残留情况进行了解析。郭战玲等<sup>[33]</sup>研究指出,河南省花生、棉花地块的地膜残留量在 6.8~37.3 kg/hm<sup>2</sup>,平均为 20.4 kg/hm<sup>2</sup>,棉花和花生的地膜残留系数分别为 1.11% 和 0.71%,如果不注重残膜回收工作,棉花和花生地块分别在 366 年和 170 年后地膜残留量达到限值;徐钰等<sup>[34]</sup>调查的山东省 10 个地块的土壤耕层地膜残留量为 5.33~46.99 kg/hm<sup>2</sup>,平均为 23.91 kg/hm<sup>2</sup>,未超过国家农田残膜限值标准,棉花和花生的地膜残留系数分别为 13.02% 和 8.56%,根据地膜残留系数计算,在沿用当前的覆膜生产模式下,此后分别连续覆膜 19 年(2033 年)和 12 年(2026 年),2 种地块的地膜残留量将会超过残膜限值标准,成为残膜污染区域;张丹等<sup>[35]</sup>对河北省的覆膜地块进行了调查,花生和棉花的年平均地膜用量分别为 37.5 和 32.0 kg/hm<sup>2</sup>,其地膜残留系数分别为 9.7% 和 14.3%,如果一直沿用目前的地膜使用模式,预计到 2021 年,花生田和棉田的地膜残留量将会分别达到 79.4 和 80.9 kg/hm<sup>2</sup>,超过国家农田残膜限值标准,成为残膜污染区域。

### 4.2 我国农田残膜污染治理策略

解决地膜残留问题任务任重道远。目前,解决我国农田残膜污染问题主要有 2 种途径:一是合理利用地膜,严格按照国家标准使用厚度为 0.01 mm 以上的地膜,并及时强制回收,保证当年机械化回收率达 80% 以上,同时做好地膜回收后的后续工作;二是推广利用降解地膜。

#### 4.2.1 地膜回收及利用。

在这方面,国家制定了一系列政策。2016 年,国务院印发《土壤污染防治行动计划》,提出加强废弃农膜回收利用;到 2020 年,河北、辽宁等农膜使用量较高省份力争实现废弃农膜全面回收利用;2017 年,农业部制定了《农膜回收行动方案》,在甘肃、新疆和内蒙古启动建设 100 个地膜治理示范县,实现示范县加厚地膜全面推广使用、回收加工体系基本建立、当季地膜回收率达到 80% 以上;同年,国家标准化管理委员会和国家质量监督检验检疫总局发布国家强制标准《聚乙烯吹塑农用地面覆盖薄膜》,要求地膜的最小标称厚度不得小于 0.010 mm,力学性能不得低于规定的性能指标,这就解决了地膜回收的根本问题;新疆从标准到立法层面对农田地膜科学使用给予了规定<sup>[29]</sup>;甘肃

也颁布了相应的政策法规<sup>[36]</sup>。目前,甘肃省农民和新疆地区兵团范围内地膜回收和再利用工作执行较好。2019年6月,农业农村部、国家发展和改革委员会、工业和信息化部等六部门联合印发《关于加快推进农用地膜污染防治的意见》,以回收、减量、替代为主要治理方式,健全制度体系,强化责任落实,完善扶持政策。《意见》提出,到2020年建立工作机制,明确主体责任,回收体系基本建立,农膜回收率达到80%以上,全国地膜覆盖面积基本实现零增长;到2025年,农膜基本实现全回收,全国地膜残留量实现负增长,农田白色污染得到有效防控。

地膜回收的关键环节在于回收机械。我国地膜回收机械研究始于20世纪80年代,机械化残膜回收主要应用于地膜覆盖面积最大的新疆、甘肃和内蒙古地区。根据农艺作业时间的不同,可分为苗期地膜回收机、秋后残膜回收机和播前残膜回收机,主要研发单位是新疆农垦科学院、新疆农业科学院,生产中投入使用的机型主要是结构简单、成本低的弹齿式搂膜机具,但无法实现高效率、高回收率、低成本、轻简化的生产目标<sup>[36]</sup>。实际应用中,秋后残膜回收机应用较多,并且多采用机械捡拾和人工捡拾相结合的回收方法。根据作物生长规律,开展作物适时揭膜技术,即在作物收获前某一时期揭膜,既能有效提高地膜回收率,对棉花生产又无不利影响<sup>[37-38]</sup>。作物收获前,特别是苗期残膜回收机应用较少,在水源较充足的地区,符合适期揭膜技术的苗期残膜回收机研发和应用有待加强。

废膜的再生利用是地膜回收工作的一个重要环节。回收的废旧农膜如不有效利用,地膜回收工作就不算结束。这样不但造成资源浪费,还会对环境造成二次污染,应采取有效措施使回收地膜再利用<sup>[28-39]</sup>;第一,回收废弃地膜作为再生塑料的原料;第二,利用回收薄膜生产环境友好型填充母料;第三,利用回收地膜进行燃料提取;第四,利用回收地膜作为建筑材料;第五,加强国际交流,引进国外的先进经验和设备及设备,以便在国内消化吸收和再利用。

**4.2.2 可降解地膜的研发与利用。**虽然现在研究的降解地膜的种类很多,包括添加剂型降解地膜、全生物降解地膜、氧化生物降解地膜和液态地膜等,但普遍存在各种各样的问题。添加剂型降解地膜降解不能完全生物降解;全生物降解地膜能完全降解,但降解进程不稳定和可控、农机作业适应性差、成本过高<sup>[28,32]</sup>;氧化生物降解地膜的埋土部分和地面暴露部分均可降解,生产工艺简单,较生物降解地膜成本低,物理性能能够满足机械化覆膜要求,诱导期具有一定可控性,且诱导期内增温保墒效果与PE地膜相同,能满足农业生产要求<sup>[40-41]</sup>,但该地膜降解进程也受环境因素影响,需要不同区域不同作物测试,山东省科学院、江苏省农业科学院已试验证明该技术塑料降解产物可作为微生物碳源被利用,但其利用过程需要进一步的研究;液态地膜对作物生长有促进作用,但其降解速度较快,宜应用于生育期较短的作物<sup>[42]</sup>。

可降解地膜在棉花、玉米、花生等作物上研究应用很

多<sup>[43-50]</sup>,在作物生长前期起到增温保墒、促进作物生长的作用,但大多处于试验阶段,目前为止还没有一种降解地膜在生产上大面积推广利用。各种类型降解地膜在创新技术流程、降低成本、加强研发等方面还有待提高。

地膜残留污染是一种新型的污染形式,也是我国特有的污染类型<sup>[1]</sup>,同时残膜污染治理工作又是公益性属性较强的工作<sup>[36]</sup>,因此这项工作需要政府、科研院校、企业、农民共同推进。

## 参考文献

- [1] 严昌荣,刘恩科,舒帆,等.我国地膜覆盖和残留污染特点与防控技术[J].农业资源与环境学报,2014,31(2):95-102.
- [2] LIU C A, JIN S L, ZHOU L M, et al. Effects of plastic film mulch and tillage on maize productivity and soil parameters[J]. European journal of agronomy, 2009, 31(4): 241-249.
- [3] KASIRAJAN S, NGOUAJIO M. Polyethylene and biodegradable mulches for agricultural applications: A review[J]. Agronomy for sustainable development, 2012, 32(2): 501-529.
- [4] ZHAO H, XIONG Y C, LI F M, et al. Plastic film mulch for half growing-season maximized WUE and yield of potato via moisture-temperature improvement in a semi-arid agroecosystem[J]. Agricultural water management, 2012, 104: 68-78.
- [5] 徐玉宏.我国农膜污染现状和防治对策[J].环境科学动态,2003(2):9-11.
- [6] 严昌荣,何文清,梅旭荣,等.农用地膜的应用与污染防治[M].北京:科学出版社,2010:76-86.
- [7] 杜利,李援农,陈朋朋,等.不同残膜量对土壤环境及玉米生长发育的影响[J].节水灌溉,2018(7):4-9.
- [8] 常芳红.地膜残留对玉米产量和土壤理化性质的影响[J].农业科技与信息,2017(20):80-82.
- [9] 邹小阳,牛文全,许健,等.残膜对土壤水分入渗的影响及入渗模型适用性分析[J].灌溉排水学报,2016,35(9):1-7.
- [10] 解红娥,李永山,杨淑奇,等.农田残膜对土壤环境及作物生长发育的影响研究[J].农业环境科学学报,2007,26(S1):153-156.
- [11] 牛文全,邹小阳,刘晶晶,等.残膜对土壤水分入渗和蒸发的影响及不确定性分析[J].农业工程学报,2016,32(14):110-119.
- [12] 邹小阳,牛文全,刘晶晶,等.残膜对土壤水分水平运动的阻滞作用[J].水土保持学报,2016,30(3):96-108.
- [13] 曹玉军,程兆东,郑百行,等.地膜覆盖残留的危害及防治对策研究[J].安徽农业科学,2015,43(6):258-259.
- [14] 王频.残膜污染治理的对策和措施[J].农业工程学报,1998,14(3):185-188.
- [15] 吾普尔江·托乎提,艾海提·牙生,巴雅尔.论地膜污染与防治对策[J].新疆环境保护,2000,22(3):176-178.
- [16] 魏迎春,唐琳.农用地膜对土壤的污染及其防治探讨[J].西藏农业科技,2010,32(1):39-41.
- [17] CHEN Y S, WU C F, ZHANG H B, et al. Empirical estimation of pollution load and contamination levels of phthalate esters in agricultural soils from plastic film mulching in China[J]. Environmental earth sciences, 2013, 70(1): 239-247.
- [18] 邹小阳,牛文全,刘晶晶,等.残膜对土壤和作物的潜在风险研究进展[J].灌溉排水学报,2017,36(7):47-54.
- [19] 于立红,王鹏,于立河,等.地膜中重金属对土壤-大豆系统污染的试验研究[J].水土保持通报,2013,33(3):86-90.
- [20] 张丹,刘宏斌,马志明,等.残膜对农田土壤养分含量及微生物特征的影响[J].中国农业科学,2017,50(2):310-319.
- [21] 祖米来提·吐尔干,林海,王亮,等.地膜残留对连作棉田土壤氮素、根系形态及产量形成的影响[J].棉花学报,2017,29(4):374-384.
- [22] 董合干,刘彤,李勇冠,等.新疆棉田地膜残留对棉花产量及土壤理化性质的影响[J].农业工程学报,2013,29(8):91-99.
- [23] 蒋金凤,温圣贤,江玉萍.农用残膜对土壤理化性质和作物产量影响的研究[J].蔬菜,2014(2):25-27.
- [24] MUMTAZ T, KHAN M R, HASSAN M A. Study of environmental biodegradation of LDPE films in soil using optical and scanning electron microscopy[J]. Micron, 2010, 41(5): 430-438.
- [25] 辛静静,史海滨,李仙岳,等.残留地膜对玉米生长发育和产量影响研究[J].灌溉排水学报,2014,33(3):52-54.

- and signal transduction[J]. Annual review of plant biology, 2004, 55: 373-399.
- [33] TEWARI R K, KUMAR P, TEWARI N, et al. Macronutrient deficiencies and differential antioxidant responses-influence on the activity and expression of superoxide dismutase in maize [J]. Plant science, 2004, 166 (3): 687-694.
- [34] TEWARI R K, KUMAR P, SHARMA P N. Magnesium deficiency induced oxidative stress and antioxidant responses in mulberry plants [J]. Scientia horticulture, 2006, 108 (1): 7-14.
- [35] 杨广东, 朱祝军. 不同光照条件下缺镁对黄瓜生长及活性氧清除系统的影响 [J]. 园艺学报, 2001, 28 (5): 430-434.
- [36] 肖常沛, 杨竹青. 镁对黄瓜与小白菜生长、养分吸收及某些酶活性的影响 [J]. 华南师范大学学报 (自然科学版), 2001 (4): 68-72.
- [37] ANZA M, RIGA P, GARBISU C. Time course of antioxidant responses of *Capsicum annuum* subjected to a progressive magnesium deficiency [J]. Annals of applied biology, 2005, 146 (1): 123-134.
- [38] 朱帅, 吴帼秀, 蔡欢, 等. 低镁胁迫对低温下黄瓜幼苗光合特性和抗氧化系统的影响 [J]. 应用生态学报, 2015, 26 (5): 1351-1358.
- [39] 姚嘉宜, 刘利英, 宋土生. 镁在基因组稳定中的作用 [J]. 国外医学 (医学地理分册), 2003, 24 (3): 115-118.
- [40] 李延, 刘星辉, 庄卫民. 缺镁对龙眼光合作用的影响 [J]. 园艺学报, 2001, 28 (2): 101-106.
- [41] 刘爱荣, 张远兵, 张雪平, 等. 铅污染对高羊茅生长、无机离子分布和铅积累量的影响 [J]. 核农学报, 2009, 23 (1): 128-133, 144.
- [42] 杨春武, 李长有, 张美丽, 等. 盐、碱胁迫下小麦体内的 pH 及离子平衡 [J]. 应用生态学报, 2008, 19 (5): 1000-1005.
- [43] 熊英杰, 陈少凤, 李恩香, 等. 植物缺镁研究进展及展望 [J]. 安徽农业科学, 2010, 38 (15): 7754-7757.
- [44] 邵岩, 雷永和, 晋艳. 烤烟水培镍临界值研究 [J]. 中国烟草学报, 1995, 2 (4): 52-56.
- [45] GRANSEE A, FÜHRS H. Magnesium mobility in soils as a challenge for soil and plant analysis, magnesium fertilization and root uptake under adverse growth conditions [J]. Plant and soil, 2013, 368 (1/2): 5-21.
- [46] CHEN Z C, MA J F. Magnesium transporters and their role in Al tolerance in plants [J]. Plant and soil, 2013, 368 (1/2): 51-56.
- [47] HERMANS C, CHEN J G, COPPENS F, et al. Low magnesium status in plants enhances tolerance to cadmium exposure [J]. New phytologist, 2011, 192 (2): 428-436.
- [48] YANG J L, YOU J F, LI Y Y, et al. Magnesium enhances aluminum-induced citrate secretion in rice bean roots (*Vigna umbellata*) by restoring plasma membrane H<sup>+</sup>-ATPase activity [J]. Plant and cell physiology, 2007, 48 (1): 66-73.
- [49] SILVA I R, SMYTH T J, ISRAEL D W, et al. Magnesium is more efficient than calcium in alleviating aluminum rhizotoxicity in soybean and its ameliorative effect is not explained by the Gouy-Chapman-Stern model [J]. Plant and cell physiology, 2001, 42 (5): 538-545.
- [50] LUO X S, LI L Z, ZHOU D M. Effect of cations on copper toxicity to wheat root: Implications for the biotic ligand model [J]. Chemosphere, 2008, 73 (3): 401-406.
- [51] LOCK K, CRIEL P, DE SCHAMPELAERE K A C, et al. Influence of calcium, magnesium, sodium, potassium and pH on copper toxicity to barley (*Hordeum vulgare*) [J]. Ecotoxicology and environmental safety, 2007, 68 (2): 299-304.
- [52] JUANG K W, LEE Y I, LAI H Y, et al. Influence of magnesium on copper phytotoxicity to and accumulation and translocation in grapevines [J]. Ecotoxicology and environmental safety, 2014, 104: 36-42.
- [53] KOPITTKER P M, KINRAIDE T B, WANG P, et al. Alleviation of Cu and Pb rhizotoxicities in cowpea (*Vigna unguiculata*) as related to ion activities at root-cell plasma membrane surface [J]. Environmental science and technology, 2011, 45 (11): 4966-4973.
- [54] KASHEM A, KAWAI S. Alleviation of cadmium phytotoxicity by magnesium in Japanese mustard spinach [J]. Soil science and plant nutrition, 2007, 53 (3): 246-251.
- [55] KUMAR T R, KUMAR P, TEWARI N, et al. Macronutrient deficiencies and differential antioxidant responses-influence on the activity and expression of superoxide dismutase in maize [J]. Plant science, 2004, 166 (3): 687-694.
- [56] 韩艳婷, 杨国顺, 石雪晖, 等. 不同镁营养水平对红地球葡萄叶绿体结构及光合响应的影响 [J]. 果树学报, 2011, 28 (4): 603-609.
- [57] 黄镜浩, 蔡子坚, 谢钟琛, 等. 硼、镁缺乏诱发柑橘叶片维管组织变化差异研究 [J]. 园艺学报, 2012, 39 (10): 1869-1875.

(上接第 22 页)

- [26] 耿智广, 宋亚丽, 林子君, 等. 地膜残留量对玉米和胡麻生长发育的影响 [J]. 甘肃农业科技, 2019 (1): 48-51.
- [27] 李元桥, 何文清, 严昌荣, 等. 残留地膜对棉花和玉米苗期根系形态和生理特性的影响 [J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34 (2): 108-114.
- [28] 严昌荣, 何文清, 刘爽, 等. 中国地膜覆盖及残留污染防控 [M]. 北京: 科学出版社, 2015: 13-28.
- [29] 许咏梅, 房世杰, 马晓鹏, 等. 农用地膜污染防治战略研究 [J]. 中国工程科学, 2018, 20 (5): 96-102.
- [30] 2017 年我国农用地膜覆盖面积使用量情况分析 新疆位居第一 [EB/OL]. (2019-08-08) [2019-09-18]. <http://data.chinabaogao.com/non-glimmuy/2019/OX4391232019.html>.
- [31] 汪军, 杨杉, 陈刚才, 等. 我国设施农业农膜使用的环境问题刍议 [J]. 土壤, 2016, 48 (5): 863-867.
- [32] 严昌荣, 何文清, 薛颖昊, 等. 生物降解地膜应用与地膜残留污染防控 [J]. 生物工程学报, 2016, 32 (6): 748-760.
- [33] 郭战玲, 张薪, 寇长林, 等. 河南省典型覆膜作物地膜残留状况及其影响因素研究 [J]. 河南农业科学, 2016, 45 (12): 58-61, 71.
- [34] 徐钰, 江丽华, 石璟, 等. 山东省典型覆膜作物地膜残留情况解析 [J]. 山东农业科学, 2018, 50 (8): 91-95, 99.
- [35] 张丹, 胡万里, 刘宏斌, 等. 华北地区地膜残留及典型覆膜作物残膜系数 [J]. 农业工程学报, 2016, 32 (3): 1-5.
- [36] 赵岩, 陈学庚, 温浩军, 等. 农田残膜污染治理技术研究现状与展望 [J]. 农业机械学报, 2017, 48 (6): 1-14.
- [37] 丁建明, 孙林. 我国废旧聚乙烯农用地膜回收研究进展 [J]. 甘肃科技, 2016, 32 (22): 71-73.
- [38] 薛文瑾, 王春耀, 朱振中, 等. 卷膜式棉花苗期残膜回收机的设计 [J]. 农业机械学报, 2005, 36 (3): 148-149, 147.
- [39] 张建伟. 农用地膜回收机械的现状与思考 [J]. 山东农机, 2005 (1): 10-11.
- [40] 袁海涛, 于谦林, 王丽红, 等. 可降解地膜降解性能及对棉花生长的影响 [J]. 华北农学报, 2017, 32 (S1): 347-352.
- [41] 袁海涛, 于谦林, 贾德新, 等. 氧化-生物双降解地膜降解性能及其对棉花生长的影响 [J]. 棉花学报, 2016, 28 (6): 602-608.
- [42] 李荣, 侯贤清. 农业环保型材料覆盖技术研究进展 [J]. 核农学报, 2016, 30 (11): 2282-2287.
- [43] 韩冬梅, 虎胆, 吐马尔白, 王振华. 北疆滴灌条件下生物降解膜的降解性能、棉田土壤水热及效益分析 [J]. 新疆农业大学学报, 2017, 40 (6): 434-441.
- [44] 刘芳, 王积军, 张哲. 氧化-生物双降解地膜在花生主产区的应用示范效果 [J]. 中国农技推广, 2018, 34 (7): 18-25.
- [45] 申丽霞, 王璞, 张丽丽. 可降解地膜的降解性能及对土壤温度、水分和玉米生长的影响 [J]. 农业工程学报, 2012, 28 (4): 111-116.
- [46] 刘蕊, 孙仕军, 张旺旺, 等. 氧化生物双降解地膜覆盖对玉米田间水热及产量的影响 [J]. 灌溉排水学报, 2017, 36 (12): 25-30.
- [47] 王斌, 万艳芳, 王金鑫, 等. PBAT 型全生物降解地膜对南疆棉花和玉米产量及土壤理化性质的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2019, 38 (1): 148-156.
- [48] 龚双凤, 杨涛, 陈宝燕, 等. 地膜降解与土壤温度和含水量的关系及其对棉花产量的影响 [J]. 西北农业学报, 2015, 24 (4): 62-68.
- [49] 邹强, 王振华, 郑旭荣, 等. PBAT 生物降解膜覆盖对绿洲滴灌棉花土壤水热及产量的影响 [J]. 农业工程学报, 2017, 33 (16): 135-143.
- [50] 张妮, 李琦, 侯振安, 等. 聚乳酸生物降解地膜对土壤温度及棉花产量的影响 [J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33 (2): 114-119.