

DOI:10.7524/AJE.1673-5897.20191010002

马兆嵘, 刘有胜, 张芊芊, 等. 农用塑料薄膜使用现状与环境污染分析[J]. 生态毒理学报, 2020, 15(4): 21-32

Ma Z R, Liu Y S, Zhang Q Q, et al. The usage and environmental pollution of agricultural plastic film [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2020, 15(4): 21-32 (in Chinese)

农用塑料薄膜使用现状与环境污染分析

马兆嵘^{1,2}, 刘有胜^{1,2,*}, 张芊芊^{1,2}, 应光国^{1,2}

1. 华南师范大学环境学院, 广州 510006

2. 广东省化学品污染与环境安全重点实验室 & 环境理论化学教育部重点实验室, 华南师范大学, 广州 510006

收稿日期: 2019-10-10

录用日期: 2019-12-25

摘要: 农用塑料薄膜(农膜)作为设施农业中重要的生产资料,在促进农业增产和增收方面发挥了重要作用,为我国农业发展做出了重大贡献。我国农膜使用量巨大且逐年不断增加,20多年来年使用量已增长4.05倍,从1991年的64.2万t增长到2017年的252.8万t。农膜的长期大量使用和缺乏有效的回收处理已导致“白色污染”加剧。本文介绍了农膜种类、组成成分和使用状况,分析了农膜造成的环境污染及其生态效应。提出了农膜的生产标准制定、正确使用以及有效的回收处理与再利用是降低农膜环境污染的主要方法,对农膜环境污染防控和构建农业生态环境平衡具有重要意义。

关键词: 农用塑料薄膜; 使用量; 残膜污染; 生态效应

文章编号: 1673-5897(2020)4-021-12 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

The Usage and Environmental Pollution of Agricultural Plastic Film

Ma Zhaorong^{1,2}, Liu Yousheng^{1,2,*}, Zhang Qianqian^{1,2}, Ying Guangguo^{1,2}

1. School of Environment, South China Normal University, Guangzhou 510006, China

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Chemical Pollution and Environmental Safety & MOE Key Laboratory of Theoretical Chemistry of Environment, South China Normal University, Guangzhou 510006, China

Received 10 October 2019

accepted 25 December 2019

Abstract: As an important material in facility agriculture, agricultural plastic film has played an important role in improving agricultural production and income, and has made significant contributions to China's agricultural development. In China, huge agricultural films are used and their amount still increases yearly. The annual usage amount of these films has increased by 4.05 times in the past 20 years, from 0.642 million tons in 1991 to 2.528 million tons in 2017. The long-term use and ineffective recycling of agricultural film have led to more serious "white pollution". This paper reviewed the types, composition and use of agricultural film, and analyzed the environmental pollution caused by agricultural film and its ecological effects. It was concluded that the manufacturing standard, sound use and effective recycling and reuse of agricultural film are the main measures to reduce their environmental pollution, which would be of great significance for prevention and control of agricultural film pollution in order to protect environment and balance of agri-ecological environment.

Keywords: agricultural plastic film; usage; residual film pollution; ecological effect

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41877359)

第一作者: 马兆嵘(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为农用塑料薄膜污染, E-mail: zhaorong.ma@m.scnu.edu.cn

* 通讯作者 (Corresponding author), E-mail: yousheng.liu@m.scnu.edu.cn

农膜包括地膜和棚膜,由于其可以改善农作物生产环境而在农业生产过程中广泛应用。农膜是继种子、化肥和农药之后的又一项重要生产资料,农膜可以起到增温、保水、防虫和防草等作用。已有研究表明,使用农膜可将种植作物生产率提升 20% ~ 50%^[1]。为了满足我国与日俱增的粮食生产需求,农膜在过去 40 年间被广泛使用。我国农膜年使用量巨大且逐年增加,从 1991 年的 64.21 万 t 增长至 2016 年的 260.26 万 t,使用量增长了 4.05 倍^[2],预计到 2020 年我国农膜使用量将达到 392 万 t^[3]。农膜经使用后大量残留于土壤中,我国地膜回收率不到 60%^[4]。目前使用的绝大部分地膜在自然条件下很难降解,可存在于农田土壤中长达几百年。农膜残留于土壤中,将影响耕作层土壤结构、影响水分和肥料营养迁移、阻碍种子发芽和植物根系生长、以及改变土壤微生物组成和破坏土壤生态平衡。地膜可以改变小麦田中半干旱土壤微生物群落的组成,增加土壤的碳含量^[5]。因此,如何确保我国农膜可持续发展使用意义重大。

本文通过总结已报道的农膜文献,综合分析了农膜类别、组成成分、使用状况、污染效应和处理方式等,归纳了地膜覆盖对土壤环境质量、植物和种植作物等影响,以及现行的农膜的回收处理方式和管理措施。并提出未来农膜污染防治的主要研究方向,以期为我国农膜可持续性使用和污染防控提供参考。

1 农膜种类、成分及特性 (Types, constiution and characteristics of agricultural plastic film)

农膜主要分为棚膜和地膜 2 种类别(表 1),另外还有遮阳网、防虫网和饲草用膜等其他类型的农用

覆盖材料。棚膜是指用于制作塑料大棚和温室的塑料农膜。地膜即地面覆盖薄膜,通常是透明或黑色 PE 薄膜,也有绿色、银色薄膜,用于地面覆盖。

1.1 农膜种类

1.1.1 棚膜

目前应用较多的主要有 2 种棚膜:温室大棚和拱形小棚。温室大棚能透光和保温(或加温),可在不适宜植物生长的季节,提供温室生育期和增加产量,多用于低温季节喜温蔬菜、花卉和林木等植物栽培或育苗等。温室大棚可以用单层或双层薄膜覆盖。双层薄膜之间隔有一层空气,可以减少传导性、对流性和长波红外辐射的损失。与单层薄膜相比,双层薄膜的加热节能率在 25% ~ 30% 之间,但太阳辐射透过率会降低^[6]。除相对高度更低以外,拱形小棚与温室大棚具有相同的特性。拱形小棚由塑料薄膜覆盖的拱形支撑结构组成,从而创造出适宜栽培作物的保护性内部气候。在晴日和夏季时节,覆盖物可被打开或移除,这是一个很大的优势,有助于增强拱形小棚的气相扩散,为作物营造更适宜的生长环境。拱形小棚可用于竹笋和西瓜等多种蔬菜瓜果的种植。

1.1.2 地膜

地膜覆盖于土壤表面,用以提高土壤温度,保持土壤水分,维持土壤结构,防止害虫侵袭作物和某些微生物引起的病害等,促进植物生长。地膜在我国大部分地区普及和应用,可在一年之中的任何时候使用,通常最佳的使用时间是土壤被预热过的晚春时节,而在中国南方,冬天气温相对温和,地膜可常年使用。地膜主要用于粮、棉、油、菜、瓜果、烟、糖、药、麻、茶和林等 40 多种农作物,可使作物普遍增产 30% ~ 50%,增值 40% ~ 60%^[7]。

表 1 农膜基本信息

Table 1 Agricultural film basic information

种类 Type		成分 Ingredient			
棚膜 Greenhouse film		低密度聚乙烯 (LDPE) 70%	线性低密度聚乙烯 (LLDPE) 10%	防雾剂 15%	其他添加剂 5%
		Low density polyethylene (LDPE) 70%	Linear low density polyethylene (LLDPE) 10%	Antifog 15%	Other additives 5%
地膜 Mulching film		低密度聚乙烯 (LDPE) 40%	高密度聚乙烯 (HDPE) 30%	线性低密度聚乙烯 (LLDPE) 15%	其他添加剂 15%
		Low density polyethylene (LDPE) 40%	High density polyethylene (HDPE) 30%	Linear low density polyethylene (LLDPE) 15%	Other additives 15%

1.2 农膜组成成分

农膜主要组成成分包括母体化合物和添加剂。母体化合物主要有聚乙烯、聚丙烯、聚氯乙烯和乙烯-乙酸乙烯酯共聚物^[8]。聚乙烯(PE)是目前应用最广泛的农膜主要成分,根据其不同的应用需求主要分为 LDPE(低密度聚乙烯)、LLDPE(线性低密度聚乙烯)和 HDPE(高密度聚乙烯)3 种类型。聚丙烯(PP)是聚烯烃族中第二常见的线性热塑性聚烯烃族聚合物,其工作温度和拉伸强度优于 PE,最广泛用于通过挤压加工生产的纤维和细丝,以及用于农业管道、压片、管网和绳线^[9]。聚氯乙烯(PVC)是一种热塑性聚合物,也是乙烯基聚合物,小部分柔性 PVC(薄膜)也被用作温室的覆盖材料。乙烯醋酸乙烯酯(EVA)是乙烯与醋酸乙烯共聚物,在柔软性和灵活性方面接近弹性材料,通常在温室农膜中的含量为 14%^[5]。根据农膜的应用需求,主要添加剂包括抗氧化剂、光稳定剂、增塑剂和促降解剂等^[9-10](表 2)。

1.3 农膜特性

农膜的性质主要取决于其母体化合物和添加剂,通常其主要成分是聚乙烯,它具有灵活性强、耐久性好、易加工、无异味和无毒等特点。添加剂则包括增塑剂、着色剂、紫外稳定剂以及其他高聚物,添加剂可影响农膜的颜色和使用寿命等特性。农膜的主要特性如下。

1.3.1 耐久性

农膜尤其是温室棚膜应用过程中需要较长的使用寿命来保障作物生长周期。影响温室棚膜使用寿命的重要参数主要是薄膜材质特征和环境因素^[11]。薄膜材质包括聚合物种类、膜种类、稳定剂类别和膜厚度等,环境因素则包括框架材料、设计方式、地理气候因素和农药使用等。另外,温室大棚薄膜中添加的一些光稳定剂如苯甲酮、苯并三唑、三嗪、镍衍生物和受阻胺类等也有效提高了其使用寿命。一般而言,抗氧化剂的添加可以有效缓解农膜氧化,农膜中抗氧化剂含量一般为 0.01%~0.05%,虽然大多数抗氧化剂无毒且具有良好的稳定效果,但苯基取代的亚磷酸酯等抗氧化剂已被认为具有一定毒性^[12]。光稳定剂可有效提高以聚烯烃为原料的塑料制品的长期抗风化能力,受阻胺类物质如 Tinuvin622 和 Chimasorb944 等常作为聚烯烃的光稳定剂,美国、英国、日本、法国、德国、加拿大和澳大利亚等国规定在聚乙烯中 Tinuvin622 最高含量为 0.3%。塑化剂可增强农膜的柔韧性和弹性,其主

要成分是邻苯二甲酸二(2-乙基)己酯(DEHP)^[13],而邻苯二甲酸酯类化合物(PAEs)已被认为具有致癌性和内分泌干扰效应^[14]。

1.3.2 光学特性

不同类型和颜色的农膜具有其典型的光学特性,可改变到达土壤的光辐射水平,导致土壤温度的升高或降低,如黑色和透明的地膜最易使土壤升温^[15]。对于那些生长在凉爽短暂季节中的暖季蔬菜作物,透明地膜对土壤的升温效果更好^[16]。然而,高透光性的缺点是缺乏杂草控制,当暴露在阳光下,杂草会继续生长^[17]。其他颜色,如红色、蓝色、黄色或橙色的地膜,可满足蔬菜生产的特殊要求,如驱除某些害虫或吸引有益昆虫等^[18-19]。农膜的关键光学特性是透光率和雾度^[20],波长在 400~700 nm 之间的可见光是植物光合作用所必需的,因此温室覆盖物必须对这部分太阳光谱尽可能透过。

1.3.3 红外传输

红外不透明农膜是蔬菜种植中常用的塑料薄膜,其红外不透特性可有效增温保暖,以及在不加热的情况下能降低结霜的风险,同时能显著降低能耗和有效降低热损失。生产过程中主要通过 2 种方式提高薄膜的红外不透明度:(1)使用填料和添加剂,如二氧化硅、碳酸盐等^[21];(2)添加含有红外吸收带的共聚物,如乙烯-乙酸乙烯酯共聚物(EVA)等。

1.3.4 抗滴防雾性

为降低雨水对农膜光透射的影响^[22],农膜通常需要通过添加一些特殊添加剂来提高其抗滴防雾性能,如添加非离子表面活性剂用于防雾膜中,将冷凝形状改变为水膜。但表面活性剂是由浓缩水萃取而成,通常在 2 个农业季节内其防雾效果会消失,因此随着农膜使用时间增加,防雾效果会逐渐降低。

2 农膜的使用状况(Use of agricultural film)

我国农膜使用量巨大,且逐年增加(表 3)。我国农膜年使用量从 1991 年的 64.2 万 t 增加到 2017 年的 252.8 万 t,26 年增长了 4.05 倍,年平均增长率为 5.4%。

我国农膜使用总量存在明确的地域特征(表 4),在农业大省诸如山东省和河南省使用量要高于其他省份,2016 年的农膜用量分别达到了 29.79 万 t 和 16.31 万 t,而农膜用量在西北如新疆维吾尔自治区和甘肃省也非常高,2016 年分别达到了 26.62 万 t 和 19.51 万 t。这 4 个地区的农膜使用量总和达到了 92.23 万 t,占当年全国农膜使用总量的 35.4%。

表 2 农膜常用添加剂
Table 2 Agricultural additives of agricultural film

种类 Type	组成 Constitution	用途 Use	用量 Dosage
填料 Filler	无机(硅酸盐、碳酸盐、氧化物、磷酸盐和碳黑等), 有机(纤维素、塑料等) Inorganic (silicates, carbonates, oxides, phosphates and carbon black, etc.), organic (cellulose, plastic, etc.)	降低成本、改善力学性能、 赋予功能 Reduce cost, improve mechanical properties, give function	填料含量较高,不同产品差别 较大,其中碳酸钙用量最大 Higher filler content, different products vary greatly, of which the largest amount is calcium carbonate
增塑剂 Plasticizer	邻苯二甲酸酯、柠檬酸酯类、苯多酸酯和氯化石蜡等 Phthalates, citrates, benzoates, chlorinated paraffins, etc.	改善塑料性能,降低生产 成本,提高生产效率 Improve plastic perform- ance, reduce production costs, and increase produc- tion efficiency	在聚氯乙烯(PVC)中含量最高 可达 50%;不同塑料增塑剂用 量不同 Up to 50% in polyvinyl chlo- ride (PVC), different plasticizers used in different amounts
阻燃剂 Flame retardant	无机(如氢氧化铝、氢氧化镁、三氧化二锑和硼酸锌), 卤系 (如十溴二苯醚、十溴二苯乙烷、溴化环氧树脂、四溴双酚 A 和六溴环十二烷), 磷系(如聚磷酸铵、磷酸酯) Inorganic (such as aluminum hydroxide, magnesium hydroxide, antimony trioxide and zinc borate), halogen (such as decabro- modiphenyl ether, decabromodiphenylethane, brominated epoxy resin, tetrabromobisphenol A and hexabromocyclododecane), phosphorus series (such as ammonium polyphosphate, phos- phate ester)	提供阻燃性能 Provides flame retardant properties	含量约 5% ~30% Content about 5% ~30%
抗氧化剂 Antioxidant	芳香胺类(如二苯胺、对苯二胺)、酚类(四[β -(3,5-二叔丁基-4- 羟基苯基)丙酸]季戊四醇酯、2,6-三级丁基-4-甲基苯酚和双 (3,5-三级丁基-4-羟基苯基)硫醚), 亚磷酸酯等 Aromatic amines (such as diphenylamine, p-phenylenediamine), phenols (tetra [β -(3, 5-di-t-butyl-4-hydroxyphenyl) propionic acid] pentaerythritol ester, 2,6-tert-butyl 4-methylphenol and bis (3,5-tert-butyl-4-hydroxyphenyl) sulfide), phosphites, etc.	抑制或减慢热氧化降解 Inhibit or slow down thermo-oxidative degradation	含量约 0.05% ~1% Content about 0.05% ~1%
光稳定剂 Light stabilizer	受阻胺、碳黑、氧化钛、酞菁蓝、酞菁绿、邻羟基二苯甲酮类、 苯并三唑类、水杨酸酯类和有机镍等 Hindered amines, carbon black, titanium oxide, phthalocyanine blue, phthalocyanine green, o-hydroxybenzophenones, benzotri- azoles, salicylates and organic nickel	阻止或延迟光老化 Prevent or delay photoaging	含量约 0.1% ~0.5% Content about 0.1% ~0.5%
抗菌剂 Antibacterial agents	银沸石、银活性炭、磷酸钛盐、季铵盐、酚醚类、苯酚类和纳 米氧化锌等 Silver zeolite, silver activated carbon, titanium phosphate, qua- ternary ammonium salt, phenol ethers, phenols and nano zinc oxide, etc.	杀菌抑菌 Sterilize	含量<1% Content <1%
着色剂 Colorant	颜料(朱砂、红土、雄黄、孔雀绿、钛白、锌钡白、铅铬黄、铁蓝 和碳黑等) Pigments (cinnabar, laterite, realgar, malachite green, titanium white, zinc barium white, lead chrome yellow, iron blue and car- bon black, etc.)	改变塑料颜色 Change plastic color	含量约 0.01% ~5% Content about 0.01% ~5%
防雾剂 Antifog	丙三醇一油酸酯、聚丙三醇酯和脱水山梨糖醇酯等 Glycerol monooleate, polyglycerol ester, sorbitan ester, etc.	防止表面起雾 Prevent surface fogging	含量约 1% ~3% Content about 1% ~3%

表 3 我国 1997—2017 年农膜和地膜使用用量统计
Table 3 Statistics on the use of agricultural film and plastic mulch in China from 1997 to 2017

年份 Year	农膜/万 t Agricultural film/($\times 10^4$ t)	地膜/万 t Plastic mulch/($\times 10^4$ t)	地膜覆盖面积/万 hm^2 Film cover area/($\times 10^4$ hm^2)	农业产值/亿元 Agricultural production value /one hundred million yuan
1997	116.2	62.6	1 003.5	13 866.9
2002	153.1	83.3	1 170.1	14 462.8
2007	193.7	105.6	1 493.8	24 659.0
2012	238.3	131.1	1 758.2	46 940.5
2017	252.8	143.7	1 865.7	58 059.8

表 4 2016 年中国各省/区农膜使用分布^[2]
Table 4 Distribution of agricultural film use in
various provinces in China in 2016^[2]

省/区 Province	农膜使用量/t Agricultural film use/t
西藏 Tibet	1 784
青海 Qinghai	7 944
北京 Beijing	9 867
天津 Tianjin	11 644
宁夏 Ningxia	15 137
上海 Shanghai	17 062
海南 Hainan	26 704
陕西 Shaanxi	43 717
重庆 Chongqing	45 265
广东 Guangdong	45 505
广西 Guangxi	48 445
山西 Shanxi	48 922
贵州 Guizhou	51 053
江西 Jiangxi	52 757
吉林 Jilin	59 565
福建 Fujian	62 424
浙江 Zhejiang	67 300
湖北 Hubei	67 306
黑龙江 Heilongjiang	82 575
湖南 Hunan	84 679
内蒙古 Inner Mongolia	95 631
安徽 Anhui	96 966
江苏 Jiangsu	113 941
云南 Yunnan	115 926
四川 Sichuan	132 384
辽宁 Liaoning	137 273
河北 Hebei	138 434
河南 Henan	163 149
甘肃 Gansu	195 092
新疆 Xinjiang	266 198
山东 Shandong	297 961

2.1 棚膜使用状况

我国 20 世纪 60 年代初开始制造和使用普通塑料棚膜,80 年代初开始研制和使用防老化聚乙烯塑料棚膜(功能棚膜),90 年代棚膜得到快速增长,增长率在 10%~15%。2000 年后塑料棚膜成为主要的农膜品种,应用已从粮食作物为主转变为以蔬菜、瓜果和花卉等经济作物为主^[23]。2010 年后,随着部分生物可降解材料的发展,可降解棚膜也应用而生。近年来,添加转光功能性母料的转光膜也开始在蔬菜种植中大规模使用,其主要作用是可以吸收阳光中的紫外线和绿光,仅透过有利于光合作用的橙红光和蓝紫光,从而可以提高蔬菜的产量和品质。我国棚膜主要在北方地区、东部沿海地区以及主要港口城市周边地区,用于蔬菜、瓜果和花卉种植,也有小部分用于畜牧业、家禽养殖和塘鱼养殖。据报道,棚膜的产量约占农膜总量的 40%左右^[24]。

2.2 地膜使用状况

我国地膜使用量从 1991 年的 31.9 万 t 增长到 2017 年的 143.7 万 t,增长了近 4.5 倍,年平均增长率

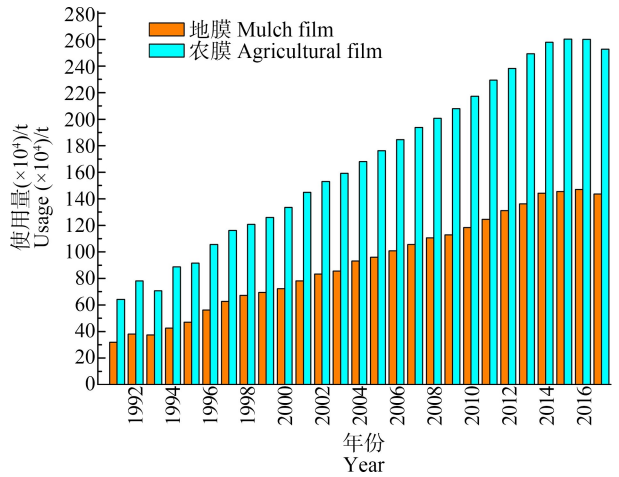


图 1 地膜和农膜使用情况^[2]

Fig. 1 Usage amount of mulching film and agricultural film^[2]

达到 6.0% (图 1)。地膜覆盖面积从 1991 年的 491 万 hm^2 增长到 2017 年的 1 866 万 hm^2 , 增长了 3.8 倍, 年平均增长率为 5.3%。我国部分农业大省 2017 年的地膜使用状况如表 5 所示, 新疆自治区、山东省和甘肃省是地膜使用量和覆盖面积最高的地区。另外, 我国也有部分地区在经济作物种植过程中使用可降解地膜, 如云南地区的烟草种植, 山东地区的花生和马铃薯种植以及新疆地区的番茄种植等, 但使用率不足 20%^[25]。而且部分降解地膜降解速度太快, 会导致棉花减产以及增温保墒效果比较差^[26]。

3 农膜的环境污染 (Pollution of agricultural film)

3.1 土壤污染

农膜使用后, 大部分并没有回收而是残留在土壤中。据报道, 我国新疆自治区长期覆膜棉田每公顷地膜平均残留量在 200 kg 以上, 甘肃省、内蒙古自治区、东北地区、山西省和河北省部分地区每公顷平均残留量在 100 kg 以上^[27]。农膜残留会影响土壤理化性质和造成二次污染, 如带来邻苯二甲酸酯污染以及可引起农药在土壤中的残留增加等^[28]。农膜残留影响土壤理化性质如下。(1)降低土壤团聚体稳定性。农膜残留可在土壤中形成阻隔层, 使耕层土壤透气性降低, 导致土壤团聚体量减少和稳定性降低。土壤团聚体减少会进一步影响土壤的雨水溅蚀力和保肥保水性能^[29-30]。(2)影响土壤抗蚀度与分

散性。农膜残留会增加土壤颗粒分散性, 减少土壤渗透和降低土壤的抗蚀性。(3)邻苯二甲酸酯污染。农膜残留会释放邻苯二甲酸酯类化合物 (PAEs) 到土壤中, 已有报道表明, 土壤中 PAEs 的本底浓度在 0.2 ~ 33.6 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间^[31], 而在农用地膜中检测出的 PAEs 浓度在 50 ~ 120 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间^[32]。当 PAEs 从覆盖膜中释放出来时, 它可能通过植物吸收蒸发的方式进入大气和径流, 并进一步分布在地下水和地表水环境中^[28, 32-33]; 另外也有研究报道, 覆盖地膜土壤中邻苯二甲酸二丁酯 (DPB) 和邻苯二甲酸二(2-乙基)己酯 (DEHP) 的浓度比未覆盖地膜的土壤高 2.5 ~ 3 倍^[34]。Kong 等^[35]还发现, 覆膜土壤中的 PAEs 浓度分别比没有覆膜的农田和蔬菜土壤中的 PAEs 浓度高了 74% 和 208%。长期使用黑膜的土壤 PAEs 含量相对更高^[36]。厚膜也已被报道会增加土壤中 DEHP 的含量, 而且厚膜比薄膜会释放更多的 PAEs^[37]。Wang 等^[32]还对南京郊区的菜田土壤进行了 6 种优先 PAEs 的研究, 发现总 PAEs 的浓度水平在 0.15 ~ 9.68 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。Kong 等^[35]在对天津市城郊农田 6 种优先 PAEs 的调查分析中发现, 总 PAEs 的范围在 0.05 ~ 10.4 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中邻苯二甲酸二正丁酯 (DnBP) 和 DEHP 的含量最高。此外, 地膜使用后也会增加农药和重金属在土壤中的残留^[38], 如有研究报道, 地膜覆盖土壤中农药和重金属污染负荷显著高于未覆盖的土壤。

表 5 2017 年农业大省各农业指标

Table 5 Agricultural indicators of the major agricultural provinces in 2017

省/区 Province	地膜使用量 Mulch use ($\times 10^4$ t)	农膜使用量 Agricultural film use/($\times 10^4$ t)	地膜覆盖面积 Film cover area ($\times 10^4$ hm^2)	农作物播种 面积/万 hm^2 Crop planting area ($\times 10^4$ hm^2)	生产总值 (GDP)/亿元 Gross domestic product (GDP) /one hundred million yuan	农业产值 (APV)/亿元 Agricultural production value (APV) /one hundred million yuan
新疆 Xinjiang	21.9	25.3	379.6	588.7	10 920.1	2 313.2
山东 Shandong	11.4	28.7	198.9	1 110.8	72 678.2	4 403.2
甘肃 Gansu	10.8	17.2	138.9	375.2	7 677.0	1 068.6
云南 Yunnan	9.6	12.0	106.5	679.1	16 531.3	1 982.5
四川 Sichuan	9.1	13.1	99.7	957.5	36 980.2	4 004.2
内蒙古 Inner Mongolia	7.8	9.4	133.3	901.4	16 103.2	1 434.7
河南 Henan	7.3	15.7	98.4	1 473.3	44 988.2	4 552.7
河北 Hebei	6.2	12.8	100.0	838.2	35 964	2 890.6
湖南 Hunan	5.7	8.5	72.4	832.2	34 590.6	2 597.6
江苏 Jiangsu	4.5	11.5	60.2	755.6	85 900.9	3 764.7

3.2 植物和作物污染

土壤中农膜残留还会影响植物和种植作物发芽、生长发育,并造成污染物在植物体内富集等。研究发现,当土壤中地膜残留量达到 $37.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,小麦发芽率与对照组相比降低 25%^[39]。地膜残留还对玉米、茄子、甘蓝和花生等作物的根系生长有显著抑制作用^[40],当残膜量达到 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,玉米叶面积显著减小,当残膜量 $>240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,作物产量显著下降^[41]。据统计,连续使用农膜 2 年以上的麦田,每公顷残留农膜碎片 103.5 kg ,小麦月减产率为 9%,连续使用 5 年的小麦田,每公顷残留农膜碎片达 375 kg ,小麦减产 26%^[42]。研究者发现,覆膜大白菜重金属积累量明显高于空白对照组,与未覆盖植物相比,其锌、镉、铜和铅的总含量提高了 90% 以上^[43]。除此之外,国内外其他相关研究者还对不同地区农田作物中 PAEs 做了相关研究,结果如表 6 所示。

3.3 塑料和微塑料污染

农膜残留还会带来塑料和微塑料污染。农膜使用后,随着风化破碎可成为大塑料和微塑料,并进入大气环境和水环境。O’Connor 等^[49]基于干-湿循环模拟研究了 100 年的微塑料迁移深度,发现土壤是陆地微塑料的主要储存场所和地下水的主要污染源载体。另外,我国每年塑料垃圾量全球最高,达到 132~353 万 t,其中农用塑料占到了 30.9%^[50]。已有报道表明,我国土壤已遭到不同程度的微塑料污染,表 7 展示了我国河北省、山东省、云南省和上海市等部分地区土壤中的微塑料分布情况。

3.4 其他污染

农膜残留还对农业生产和农业环境带来一系列其他负面影响。如:焚烧残膜可产生有害气体排放污染大气;牛、羊等牲畜食用混有残膜的农作物秸秆和草料可能会诱发胃肠功能障碍,出现严重厌食症甚至造成死亡^[55];残膜对田边、运河和林间也会造成

表 6 不同地区可食用作物中邻苯二甲酸酯 (PAEs) 含量
Table 6 Phthalate esters (PAEs) content in edible crops in different regions

蔬菜 Vegetables	地区 City	PAEs 种类 Types of PAEs	检测浓度/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) Concentration/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	参考文献 Reference
冬瓜 Waxgourd	杭州 Hangzhou	DEHP	560.0~1 480.0 (干重 Dry weight)	[44]
雪菜 Pickle	杭州 Hangzhou	DEHP	34.0 $\pm$ 2.5 (干重 Dry weight)	[37]
莴苣 Lettuce	东莞 Dongguan	6 种优先 PAEs 6 Priority PAEs	6.9 (干重 Dry weight)	[45]
油菜 Cole	台州 Taizhou	DEHP	2.3~6.3 (湿重 Wet weight)	[46]
黄瓜 Cucumber	寿光 Shouguang	DEHP	0.4~0.7 (湿重 Wet weight)	[47]
大葱 Scallion	广东 Guangdong	DEHP	0.5 (干重 Dry weight)	[48]
白菜 Chinese cabbage	广东 Guangdong	DEHP	0.3~3.2 (干重 Dry weight)	[48]

注:DEHP 表示邻苯二甲酸二辛酯。
Note: DEHP stands for diethylhexyl phthalate.

表 7 不同地区土壤微塑料的分布情况
Table 7 Distribution characteristics of microplastic in different regions

省/区 Province	丰度/($\text{个}\cdot\text{kg}^{-1}$) Abundance/(each $\cdot\text{kg}^{-1}$)	组成 Composition	尺寸范围/mm Size/mm	参考文献 Reference
河北 Hebei	634	PE、PP、PVC	1.56 $\pm$ 0.63	[51]
山东 Shandong	1.3~14.7	PE、PP、PS	1.00	[52]
云南 Yunnan	78 $\pm$ 12.91	PE、PP	0.05~10.00	[53]
上海 Shanghai	62.50 $\pm$ 12.97	PE、PP、PVC	0.03~16.00	[54]

注:PE 表示聚乙烯,PP 表示聚丙烯,PVC 表示聚氯乙烯,PS 表示聚苯乙烯。
Note: PE stands for polyethylene; PP stands for polypropylene; PVC stands for polyvinyl chloride; PS stands for polystyrene.

“视觉污染”^[56];影响田间机械耕作,导致开沟机易缠绕和播种质量下降。

4 农膜的处理、防治与管理 (Treatment, prevention and management)

农膜的处理既是环境问题又是经济问题,因为它们可能会对景观环境、农用土壤、大气、地表水和地下水环境造成严重的弥散性破坏^[57]。农膜通常被焚烧、回收、填埋或非法处理^[58-60]。农膜回收利用的主要处理方式是再生造粒后生产各种塑料制品^[61]。

4.1 农膜的回收处理

4.1.1 焚烧

目前农膜的焚烧有2种,一种是农民经常采用的原位焚烧或露天焚烧,还有一种是回收后的燃烧发电或者是用作燃料^[62]。但焚烧处理会产生一氧化碳、硫化氢、二氧化硫、氨气以及二噁英等有毒致癌物,给生态环境和人体健康带来潜在风险^[63-64]。

4.1.2 填埋

目前无法回收利用的农膜基本上都是采用填埋的方式处理。但填埋处理只能是暂时的处理方式,且填埋后往往会使得填埋区土壤质量退化,同时也可能造成土壤污染以及大气污染,对区域食品安全和人体健康带来危害^[65]。

4.2 农膜的防治技术

回收处理和回收再利用是农膜防治的基本做法。主要用以下方式。(1)适期揭膜技术^[66]。根据作物种类和区域条件,形成合理的揭膜时间和揭膜方式,在地膜完成其功能且又未老化破损之前进行揭膜回收,提高地膜回收率。如新疆自治区的棉花头水前揭膜,在膜还未老化前回收,可使回收率达到90%以上^[67]。山西省玉米覆膜在玉米出苗后45 d揭膜,也能大幅度提高地膜回收率^[68]。(2)回收再利用技术。通过回收地膜作为再生塑料的原料,利用回收薄膜产生环境友好型填充母料,利用回收地膜进行燃料提取,以及利用回收地膜作为建筑材料。(3)使用可降解农膜。通过添加促降解剂来加速残留在土壤中的农膜自然消解,减少残膜对环境的污染,避免了农膜在土壤中的过度积累^[69]。有研究人员发现,加入促降解剂后,印度粉蛾(*Plodia interpunctella*)可在60 d内降解6%~10%的聚乙烯^[70]。但目前研制的促降解添加剂还过于昂贵,实际应用性不高。

4.3 农膜的管理政策

为了有效防治农膜带来的环境污染,严格的管

理政策和法规是根本。因此,需要政府制定严格的行业标准和强制立法,使农膜在生产、使用和回收过程中能有效监管,确保生产的农膜符合生产标准,提高农膜的回收和利用。在这个方面国外有一些好的做法可以给我们提供参考。另外,事实上我国也已经开始制定相关的标准和法规来控制农膜的环境污染。

4.3.1 国内

为控制农膜残留污染,我国也制定了2项国家标准:《农田地膜残留量限值及测定》(GB/T 25413—2010)和《棉花种植用地膜厚度限值及测定》(GB/T 25414—2010),这2项标准规定了待播农田耕作层内地膜残留量应不大于 $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,棉花种植用地膜厚度应不小于0.008 mm,以此来确保能机械回收地膜。另外,农业部也提出了“一控、两减、三基本”和《关于打好农业面源污染防治攻坚战的实施意见》,其中农膜的污染治理是其中一项重要工作,明确指出需要加大农业面源污染防治力度,推广高标准农膜和残膜回收试点,加强农业生态治理,开展农田残膜回收区域性示范,严厉打击违法生产和销售不合格农膜的行为。国务院制定的《土壤污染防治行动计划》也提出,加强废弃农膜回收利用,明确了农用地膜的回收和再利用目标,到2020年,我国农膜回收率应达到80%以上。

4.3.2 国外

欧盟、美国和日本等鼓励使用高强度、可降解地膜替代普通地膜。美国通过使用可降解地膜和推广应用高强度、耐老化的地膜,以及采用卷收设备进行回收来降低残膜危害。日本则制定行业标准要求地膜厚度在0.02 mm以上,另外日本还颁布了《日本废弃物处理及清扫法》,规定使用地膜必须经专业公司回收利用。欧盟则建立了农用塑料标记协会(Lable AgriWaste)来制定欧洲农用塑料废物标签制度^[71],同时通过颁布《农业废弃物填埋条例》和《农业废弃物焚烧条例》对废弃农膜回收处理进行了明确规定。意大利和法国环保部出台农业塑料废弃物回收和利用法律条文,对农膜回收利用进行规范处理^[27]。

5 结论与建议 (Conclusion and suggestion)

农膜的开发和使用增加了农业生产收益,显著提高了农田土地利用效率。然而,缺乏有效的回收、处理和再利用,农膜土壤残留将造成土壤、地下水、地表水、植物作物和大气污染,甚至对人体健康产生

影响。因此,确保农膜的生产质量、提高农膜残膜回收率和推广切实可行的农膜回收再利用技术是农膜污染防治的重点。基于此,提出以下未来研究的方向:

(1)开展低价可降解农膜的研发,研制低成本的促降解添加剂,进一步提升可降解地膜的可控性和稳定性,有效缩短农膜在土壤中的自然削减时间,降低残膜的环境效应;

(2)加快制定针对我国农膜管理的法律法规,细化农膜生产、使用和回收相关标准、要求和制度,明确各级政府部门在农膜生产、流通、使用和回收各环节的管理职责;

(3)大力发展废弃农膜循环利用制度,对农膜制造商、销售机构和回收处理机构实行责任制,形成完备的循环利用制度体系,建立农膜回收经济补偿体系,切实提高残膜回收处理效率。

通讯作者简介:刘有胜(1981—),男,博士,副研究员,主要研究方向为环境微生物学与生态毒理学。

参考文献 (References):

- [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
Yan C R, Liu E K, Shu F, et al. Review of agricultural plastic mulching and its residual pollution and prevention measures in China [J]. Journal of Agriculture Resources and Environment, 2014, 31(2): 95-102 (in Chinese)
- [2] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴(1992—2018)[M].北京:中国统计出版社,2018: 43-48
National Bureau of Statistics of China. China Statistical Yearbook. From 1992 to 2018 [M]. Beijing: China Statistics Press: 43-48 (in Chinese)
- [3] 周大纲.我国农膜行业的现状及其发展对策(2015年)[J].塑料助剂,2015(6): 13-15
Zhou D G. Status quo of agro-film industry (2015) of China and countermeasure for its development [J]. Plastic Additives, 2015(6): 13-15 (in Chinese)
- [4] Stevens E S. Green plastics, an introduction to the new science of biodegradable plastics [J]. Journal of Industrial Ecology, 2010, 7(3-4): 231-233
- [5] Li F, Song Q, Jjemba P, et al. Dynamics of soil microbial biomass C and soil fertility in cropland mulched with plastic film in a semiarid agro-ecosystem [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2004, 36(11): 1893-1902
- [6] Scarascia-Mugnozza G, Sica C, Russo G. Plastic materials in European agriculture: Actual use and perspectives [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2011, 42(3): 15-28
- [7] 中国地膜覆盖栽培研究会.地膜覆盖栽培技术大全[M].北京:农业出版社,1988: 29-30
- [8] Espí E, Salmerón A, Fontecha A, et al. Plastic films for agricultural applications [J]. Journal of Plastic Film & Sheeting, 2006, 22(2): 85-102
- [9] McEwan I, Arrighi V, Grant Cowie J M. Structure and Properties of Polymers Commonly Recycled [M]// La Mantia F (Ed). Handbook of Plastic Recycling. Rapra Technology Ltd, 2002: 1-22
- [10] Tarara J M. Microclimate modification with plastic mulch [J]. HortScience: A publication of the American Society for Horticultural Science, 2000, 35(2): 169-180
- [11] Gugumus F L. Greenhouse film stabilization [J]. Environmental Science and Pollution Control Series, 2000: 39-80
- [12] 陈志锋,潘健伟,储晓刚,等.塑料食品包装材料中有毒有害化学残留物及分析方法[J].食品与机械,2006, 22(2): 3-7
Chen Z F, Pan J W, Chu X G, et al. Test and analysis methods for chemical contaminants in plastic food packaging materials [J]. Food and Machinery, 2006, 22(2): 3-7 (in Chinese)
- [13] Chou K, Wright R O. Phthalates in food and medical devices [J]. Journal of Medical Toxicology, 2006, 2(3): 126-135
- [14] Erkekoglu P, Kocer-Gumusel B. Genotoxicity of phthalates [J]. Toxicology Mechanisms and Methods, 2014, 24(9): 616-626
- [15] Ham J M, Kluitenberg G J, Lamont W J. Optical properties of plastic mulches affect the field temperature regime [J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1993, 118(2): 188-193
- [16] Waterer D. Evaluation of biodegradable mulches for production of warm-season vegetable crops [J]. Canadian Journal of Plant Science, 2010, 90(5): 737-743
- [17] Lament W J. Plastic Mulches for the Production of Vegetable Crops [M]// A Guide to the Manufacture Performance & Potential of Plastics in Agriculture. Elsevier Ltd., 2017: 45-60
- [18] Csizinszky A A, Schuster D J, Polston J E. Effect of ultraviolet-reflective mulches on tomato yields and on the silverleaf whitefly [J]. Hortscience: A Publication of the American Society for Horticultural Science, 1999, 34(5). DOI: 10.21273/HORTSCI.34.5.911
- [19] Lamont W J, Sorensen K A, Averre C W. Painting aluminium strips of black plastic mulch reduces mosaic symptoms on summer squash [J]. Hortscience, 1990, 25

- (10): 1305
- [20] Waaijenberg D, Gbiorczyk K, Feuilloy P, et al. Measurement of optical properties of greenhouse cladding materials: Harmonisation and standardisation [J]. *Acta Horticulturae*, 2003(633): 107-113
- [21] Tapia G J, Martinez O G. Polymeric covering materials for growing plants or crops: USA, US4559381 A [P]. 1985-01-01 [2019-10-10]
- [22] Gbiorczyk K, Sonneveld P J, Bot G P A, et al. The effect of roof inclination on the condensation behaviour of plastic films used as greenhouse covering materials [J]. *Acta Horticulturae*, 2004(633): 127-136
- [23] 乌云, 白剑臣. 我国塑料棚膜的发展现状分析[J]. 内蒙古石油化工, 2009(8): 78-79
Wu Y, Bai J C. Analysis on development of plastics greenhouse films [J]. *Inner Mongolia Petrochemical*, 2009(8): 78-79 (in Chinese)
- [24] 徐玲, 李兆杰. 农用塑料棚膜的市场与发展[J]. 上海塑料, 2001(1): 8-10
- [25] 朱梦诗, 刘从九. 浅谈我国废旧农膜回收利用现状[J]. 长沙大学学报, 2015, 29(2): 101-104
Zhu M S, Liu C J. On the recycle status of agricultural plastic films in China [J]. *Journal of Changsha University*, 2015, 29(2): 101-104 (in Chinese)
- [26] 赵彩霞, 何文清, 刘爽, 等. 新疆地区全生物降解膜降解特征及其对棉花产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(8): 1616-1621
Zhao C X, He W Q, Liu S, et al. Degradation of biodegradable plastic mulch film and its effect on the yield of cotton in Xinjiang Region, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(8): 1616-1621 (in Chinese)
- [27] 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): 6-19
Zhao Y, Chen X G, Wen H J, et al. Research status and prospect of control technology for residual plastic film pollution in farmland [J]. *Journal of Agricultural Machinery*, 2017, 48(6): 6-19 (in Chinese)
- [28] He L, Gielen G, Bolan N S, et al. Contamination and remediation of phthalic acid esters in agricultural soils in China: A review [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2015, 35(2): 519-534
- [29] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics [J]. *Soil & Tillage Research*, 2004, 79(1): 7-31
- [30] Sharma P, Abrol V, Sankar G M. Effect of tillage and mulching management on the crop productivity and soil properties in maize-wheat rotation [J]. *Research on Crops*, 2009, 10(3): 536-541
- [31] Zeng F, Cui K, Xie Z, et al. Phthalate esters (PAEs): Emerging organic contaminants in agricultural soils in peri-urban areas around Guangzhou, China [J]. *Environmental Pollution*, 2008, 156(2): 425-434
- [32] Wang J, Luo Y, Teng Y, et al. Soil contamination by phthalate esters in Chinese intensive vegetable production systems with different modes of use of plastic film [J]. *Environmental Pollution*, 2013, 180: 265-273
- [33] Hu X Y, Wen B, Shan X Q. Survey of phthalate pollution in arable soils in China [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2003, 5(4): 649-653
- [34] 吴学玲, 代沁芸, 梁任星, 等. 利用高效降解菌株强化修复土壤中 DBP 及其细菌群落动态解析[J]. 中南大学学报, 2011, 42(5): 16-22
Wu X L, Dai Q Y, Liang R X, et al. Biodegradation of DBP contaminated soil by high-efficiency degrading strain and dynamics analysis of bacterial community [J]. *Journal of Central South University*, 2011, 42(5): 16-22 (in Chinese)
- [35] Kong S F, Ji Y Q, Liu L L, et al. Diversities of phthalate esters in suburban agricultural soils and wasteland soil appeared with urbanization in China [J]. *Environmental Pollution*, 2012, 170: 161-168
- [36] 陈永山, 骆永明, 章海波, 等. 设施菜地土壤酞酸酯污染的初步研究[J]. 土壤学报, 2011, 48(3): 516-523
Chen Y S, Luo Y M, Zhang H B, et al. Preliminary study on PAEs pollution of greenhouse soils [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(3): 516-523 (in Chinese)
- [37] Fu X W, Du Q Z. Uptake of di-(2-ethylhexyl) phthalate of vegetables from plastic film greenhouses [J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2011, 59(21): 11585-11588
- [38] Dietrich A M, Gallagher D L. Fate and environmental impact of pesticides in plastic mulch production runoff: Field and laboratory studies [J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2002, 50(15): 4409-4416
- [39] 赵素荣, 张书荣, 徐霞, 等. 农膜残留污染研究[J]. 农业环境与发展, 1998, 15(3): 7-10
Zhao S R, Zhang S R, Xu X, et al. Study on the agricultural plastic sheeting residue pollution [J]. *Agro-Environment and Development*, 1998, 15(3): 7-10 (in Chinese)
- [40] Liu X Y, Liu Y J. Study on permissible value of plastic residual piece in field soil [J]. *Soil and Fertilizer*, 1991, 5: 27-30
- [41] Gao H H, Yan C R, Liu Q, et al. Effects of plastic mulching and plastic residue on agricultural production: A meta-analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2019,

- 651: 484-492
- [42] 张建华, 朱惠斌. “白色污染”及其治理方法[J]. 黄河水利职业技术学院学报, 2000, 12(3): 40-42
Zhang J H, Zhu H B. “White Pollution” and its control methods [J]. Journal of Yellow River Conservancy Technical Institute, 2000, 12(3): 40-42 (in Chinese)
- [43] Moreno D A, Vllora G, Hernández J, et al. Accumulation of Zn, Cd, Cu, and Pb in Chinese cabbage as influenced by climatic conditions under protected cultivation [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(7): 1964-1969
- [44] 方杰. 蔬菜中 DEHP 含量分析及冬瓜累积 DEHP 初探[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2008: 35-37
Fang J. Analysis of DEHP content in vegetables and cumulation of DEHP in *Benincasa hispida* [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2008: 35-37 (in Chinese)
- [45] 张茂生, 李明阳, 王纪阳, 等. 东莞市蔬菜基地邻苯二甲酸酯(PAEs)的污染特征研究[J]. 广东农业科学, 2009(6): 172-175
Zhang M S, Li M Y, Wang J Y, et al. Occurrence of phthalic acid esters (PAEs) in vegetable fields of Dongguan City [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2009(6): 172-175 (in Chinese)
- [46] 刘文莉, 张珍, 朱连秋, 等. 电子垃圾拆解地区土壤和植物中邻苯二甲酸酯分布特征[J]. 应用生态学报, 2010, 21(2): 489-494
Liu W L, Zhang Z, Zhu L Q, et al. Distribution characteristics of phthalic acid esters in soils and plants at e-waste recycling sites in Taizhou of Zhejiang, China [J]. Journal of Applied Ecology, 2010, 21(2): 489-494 (in Chinese)
- [47] 王丽霞. 保护地邻苯二甲酸酯污染的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2007: 35-38
Wang L X. Studies on phthalate esters pollution in protected fields [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2007: 35-38 (in Chinese)
- [48] 李米, 蔡全英, 曾巧云, 等. 绿色食品和有机食品蔬菜基地土壤和蔬菜中邻苯二甲酸酯的分布特征[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(19): 10189-10191
Li M, Cai Q Y, Zeng Q Y, et al. Occurrence of phthalic acid esters in soils and vegetables from green food and organic vegetable fields [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(19): 10189-10191 (in Chinese)
- [49] O'Connor D, Pan S, Shen Z, et al. Microplastics undergo accelerated vertical migration in sand soil due to small size and wet-dry cycles [J]. Environmental Pollution, 2019, 249: 527-534
- [50] Jambeck J R, Geyer R, Wilcox C, et al. Plastic waste inputs from land into the ocean [J]. Science, 2015, 347(6223): 768-771
- [51] 周倩, 章海波, 周阳, 等. 滨海潮滩土壤中微塑料的分离及其表面微观特征[J]. 科学通报, 2016, 61(14): 1604-1611
Zhou Q, Zhang H B, Zhou Y, et al. Separation of microplastics from a coastal soil and their surface microscopic features [J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(14): 1604-1611 (in Chinese)
- [52] Zhou Q, Zhang H, Fu C, et al. The distribution and morphology of microplastics in coastal soils adjacent to the Bohai Sea and the Yellow Sea [J]. Geoderma, 2018, 322: 201-208
- [53] Zhang G S, Liu Y F. The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwestern China [J]. Science of the Total Environment, 2018, 642: 12-20
- [54] Liu M T, Lu S B, Song Y, et al. Microplastic and mesoplastic pollution in farmland soils in suburbs of Shanghai, China [J]. Environmental Pollution, 2018, 242: 855-862
- [55] 严昌荣, 梅旭荣, 何文清, 等. 农用地膜残留污染的现状与防治[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 269-272
Yan C R, Mei X R, He W Q, et al. Present situation of residue pollution of mulching plastic film and controlling measures [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(11): 269-272 (in Chinese)
- [56] 何文清, 严昌荣, 赵彩霞, 等. 我国地膜应用污染现状及其防治途径研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(3): 533-538
He W Q, Yan C R, Zhao C X, et al. Study on the pollution by plastic mulch film and its countermeasures in China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(3): 533-538 (in Chinese)
- [57] Sica C. Environmental problems connected to the use of plastic materials in protected cultivation [D]. Potenza, Italy: The University of Basilicata, 2000: 28-35
- [58] Miller B G, Wasco R S, Johnson D, et al. Used Agricultural Plastic Mulch as a Supplemental Boiler Fuel [C]. 20th Proceedings of the National Agricultural Plastics Congress, 2002: 53-57
- [59] Kijchavengkul T. Design of biodegradable aliphatic aromatic polyester films for agricultural applications using response surface methodology [D]. East Lansing, MI: Michigan State University, 2010: 55-60
- [60] Lamont W J, Bartok J W. Production of vegetables, strawberries, and cut flowers using plasticulture [M]. Natural Resource, Agriculture, and Engineering Service, Cooperative Extension, 2004: 99-102
- [61] 李诗龙. 废旧农膜的回收再生利用技术[J]. 再生资源研究, 2005(1): 9-12

- Li S L. Recycling agricultural plastic films [J]. Renewable Resources Research, 2005(1): 9-12 (in Chinese)
- [62] La Mantia F. Handbook of Plastics Recycling [M]. John Wiley & Sons, Ltd., 2002: 441
- [63] Briassoulis D, Hiskakis M, Scarascia G, et al. Labeling scheme for agricultural plastic wastes in Europe [J]. Quality Assurance and Safety of Crops & Foods, 2010, 2(2): 93-104
- [64] Sica C, Godosi Z, Picuno P. The management of agricultural plastic packaging waste: A pilot experimentation in southern Italy [C]. Belgrade-Zemun: The First International Symposium on Agricultural Engineering, 2013: 69-76
- [65] Hemphill D D. Agricultural plastics as solid waste: What are the options for disposal [J]. HortTechnology, 1993, 3 (1): 70-73
- [66] 王书荣, 王玲欣. 推广适期揭膜 减轻白色污染[J]. 河北农业, 2008(8): 5
- [67] 米岁芳, 王萍, 张惠文. 棉花地地膜残留及其对策的试验研究[J]. 新疆环境保护, 1998, 20(1): 27-30
- [68] 张培增, 张建中. 地膜覆盖栽培机械化技术[J]. 山西农机, 1997(6): 19
- [69] Kyrikou I, Briassoulis D. Biodegradation of agricultural plastic films: A critical review [J]. Journal of Polymers and the Environment, 2007, 15(2): 125-150
- [70] Krueger M C, Harms H, Schlosser D. Prospects for microbiological solutions to environmental pollution with plastics [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2015, 99(21): 8857-8874
- [71] 胡钰, 刘代丽, 王莉, 等. 发达国家农膜使用情况及回收经验[J]. 世界农业, 2019(2): 16 ◆