

DOI: 10.12357/cjea.20230563

赵记军, 唐继荣, 李崇霄, 何红琴, 黄浩. 甘肃农田耕层土壤地膜残留分布特征及影响因素[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(3): 456–467

ZHAO J J, TANG J R, LI C X, HE H Q, HUANG H. Distribution and influencing factors of plastic film residues in topsoil of farmland in Gansu Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(3): 456–467

甘肃农田耕层土壤地膜残留分布特征及影响因素^{*}

赵记军, 唐继荣, 李崇霄, 何红琴, 黄浩

(甘肃省农业生态与资源保护技术推广总站 兰州 730000)

摘要: 甘肃是全国地膜用量、覆盖面积较大和覆盖时间较长的省份, 地膜覆盖种植产生的残留地膜是影响农业绿色可持续发展的一个突出问题。通过在甘肃省主要覆膜农田布设 960 个监测样地, 结合样品采集与农户调查方式, 对 0–30 cm 耕层土壤地膜残留分布特征及影响因素进行调查, 评估农田地膜残留现状, 为防控治理提供工作参考。结果表明: 960 个样地耕层土壤均有不同程度的地膜残留, 地膜残留量为 $0.02\sim 204.75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 地膜残留量中位数为 $12.96\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。地膜残留量处于清洁阈值 ($<75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、轻度污染阈值 ($75\sim 120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、中度污染阈值 ($120\sim 270\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、重度污染阈值 ($>270\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 的样地占比分别为 97.6%、1.8%、0.6%、0, 轻度、中度污染阈值样地大多位于河西灌溉农业区, 而所有县域、市域、区域农田地膜残留量全部小于 $75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。地膜残留量受覆膜年限、种植作物类型、种植户类型、回收方式等因素影响: 覆膜年限 11~20 a、>20 a 地膜残留量显著高于 6~10 a ($P<0.05$), 呈现出年限越长残留量越大的趋势; 制种作物地块地膜残留量最大、设施蔬菜地块地膜残留量最小, 前者达到后者的 7 倍左右, 制种作物、经济作物、玉米、马铃薯、露地蔬菜、中药材地块地膜残留量显著高于设施蔬菜 ($P<0.05$); 合作社地块的地膜残留量显著高于一般农户 ($P<0.05$), 约为一般农户的 1.5 倍; 农田残膜通过人工捡拾、人工捡拾+机械回收、机械回收 3 种方式进行离田回收, 并以人工捡拾为主, 但是人工+机械回收的地膜残留量显著高于人工回收 ($P<0.0001$); 相对而言, 种植作物类型是造成研究区地膜残留量空间变化的主导因素。残膜由农户回收整理后通过商贩到田现场收购、网点组织统一回收或农户自行以旧换新 3 种方式转运到加工企业再生加工后全部得到资源化利用。调查表明, 甘肃农田耕层土壤地膜残留空间分布差异较大, 总体上处于较轻水平, 呈现出少数样地污染、面上整体清洁的特征。建议以减量、回收、替代并重思路为导向进一步做好地膜残留防控工作。本研究可为进一步完善甘肃地膜科学使用回收政策和机制提供数据支撑。

关键词: 地膜; 残留量; 农田土壤; 农业面源污染; 甘肃省

中图分类号: X71

Distribution and influencing factors of plastic film residues in topsoil of farmland in Gansu Province^{*}

ZHAO Jijun, TANG Jirong, LI Chongxiao, HE Hongqin, HUANG Hao

(Agricultural Ecology and Resource Protection Technology Extension Station of Gansu Province, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The application of agricultural film mulching technology has greatly promoted the development of agriculture in arid and semi-arid areas. Gansu Province has a large amount film, large coverage area, and long coverage time for plastic film mulching on farmland. The residual plastic film produced by plastic film mulching is a prominent problem that affects the green and sustainable

^{*} 甘肃省省级财政农业生态环境保护项目(甘农财发〔2022〕8号)资助

赵记军, 主要从事农业生态环境监测评价方面的工作。E-mail: daniel.zhao@126.com

收稿日期: 2023-10-07 接受日期: 2024-01-18

^{*} This study was supported by the Agricultural Ecological Environment Protection Project of Gansu Province Finance (the Planning and Finance Office of Gansu Provincial Department of Agriculture and Rural Affairs issued document [2022] No.8).

Corresponding author, ZHAO Jijun, E-mail: daniel.zhao@126.com

Received Oct. 7, 2023; accepted Jan. 18, 2024

development of agriculture. In this study, the distribution and influencing factors of plastic film residue in the 0–30 cm soil of farmland were investigated by setting up 960 monitoring sample sites in the main areas with mulched farmland of Gansu Province, combined with sample collection and farmer survey methods. This study aimed to evaluate the current status of plastic film residue in farmlands and provide guidance for prevention and control measures of pollution of plastic film residues in Gansu Province. The results showed that the residual amount of plastic film was 0.02–204.75 kg·hm⁻², and the median of plastic film residues was 12.96 kg·hm⁻² in 960 sites. Most of the mild and moderate pollution sites were located in Hexi-irrigated agricultural areas. Among them, the proportion of plastic film residues was 97.6% at the clean threshold (less than 75 kg·hm⁻²), 1.8% at mild pollution threshold (75–120 kg·hm⁻²), 0.6% at moderate pollution threshold (120–270 kg·hm⁻²), and 0 at severe pollution threshold (higher than 270 kg·hm⁻²), respectively. The residual amount of plastic film was affected by the number of film mulching years, type of planting crops, type of planters, recycling methods, and other factors. The residual amount of plastic film with film mulching years of 11–20 years and >20 years was significantly higher than that with film mulching years of 6–10 years ($P<0.05$), and the longer the age, the greater the residue. The amount of residues of the seed crop site was the largest at nearly seven times that of the greenhouse vegetables site. Plastic film residues in the fields of seed crops, economic crops, maize, potato, outdoor vegetables, and Chinese herbal medicine were significantly higher than those in the fields of greenhouse vegetables ($P<0.05$). The residual amount of the cooperative field was 1.5 times that of the general farmers. The farmland residual film was recovered in three ways: manual picking up, manual picking up + mechanical recycling, and mechanical recycling. The amount of residual film in fields with the recovery method of manual picking up + mechanical recycling was significantly higher than that with manual picking up ($P<0.0001$). Type of planting crops was the dominant factor causing spatial changes in plastic film residues in the study area. After removal from the farmland, the residual film was regenerated and processed through merchants purchasing, networks recycling, or farmers' exchanging. This survey of residual plastic films showed that the spatial distribution of plastic film residues in farmland soil was quite different in Gansu Province, and the residual plastic film in the topsoil of farmland was generally at a low level, showing the distribution of pollution at a few sites and overall cleanliness on the surface. Prevention and control of plastic film residues should be further carried out under the guidance of reduction, recovery, and substitution. This study provides data for further improvement of policies and mechanisms for the scientific use and recycling of plastic films in Gansu Province.

Keywords: Mulching film; Residual amount; Farmland soil; Agricultural non-point source pollution; Gansu Province

农田覆盖是一种历史悠久的作物栽培技术。地膜作为重要的生产资料,在农业生产中的广泛应用对农业产生了巨大影响,带动农业生产方式和区域种植结构发生了革命性变化^[1]。地膜覆盖种植可以改善土壤水热效应、抑盐控草、防虫抗病和增加经济效益,使粮食作物增产 20%~35%,经济作物增产 20%~60%,极大地促进了农业产量和效益的提高,已成为干旱半干旱地区、低温缺水地区和气温降水变化幅度较大地区的重大栽培技术之一,在我国现代农业生产中具有重要意义^[2]。自 1979 年引入后,我国农用地膜使用量呈现显著持续增长趋势,统计数据显示,2021 年我国地膜使用量为 1.32×10^6 t,约占全世界地膜使用总量 90%。由于以往环保意识滞后、地膜标准宽松、回收体系缺失等原因,大量地膜的使用导致农田土壤中地膜残留量不断增加,这给农业生态环境带来诸多负面影响,如破坏土壤结构、阻碍水肥运移、影响作物发育、降低作物产量等^[3]。地膜覆盖技术是一把双刃剑,传统常用覆盖地膜(PE 地膜)是以聚乙烯为主要原料,通过添加抗氧化剂、紫外线吸收剂等人工合成的一种高分子聚合物,其分子结构极其稳定,在自然条件下短期内很难降解,在环境中的自净能力非常有限,如果长期“重使用、

轻回收”,随着农膜使用量的持续增加和使用年数的不断增长,残留地膜将破坏土壤-作物生态系统平衡,在一定年份内增产的前提下,需要承担农业生态环境恶化与未来多年连续减产的双风险^[4]。

甘肃属于干旱和半干旱气候区,水资源严重缺乏是农业生产的关键限制性因子。由于覆膜种植在破解干旱这一制约农业发展瓶颈的问题中具有突出效益,地膜覆盖技术已逐步由最初经济价值较高的蔬菜、花卉等经济作物推广到玉米(*Zea mays*)、马铃薯(*Solanum tuberosum*)、小麦(*Triticum aestivum*)等大田作物种植上,并成为甘肃农业生产中应用最广、增效最明显的农艺措施^[5],甘肃也成为我国地膜用量、覆盖面积较大和覆盖时间较长的省份之一。与此同时,伴随产生的废旧地膜对农村生活环境带来的“视觉污染”,对农业生产环境构成的“潜在威胁”也成为影响农田生态环境和农业绿色可持续发展的突出问题^[6]。

全省农业环保行业业务数据显示,2011 年以来,甘肃农田地膜覆盖面积和使用量总体呈上升趋势,并大致可分为两个阶段:2016 年前,地膜覆盖面积从 9.33×10^5 hm² 增加到 1.91×10^6 hm²,地膜使用量从 8.0×10^4 t 增加到 1.8×10^5 t,两者均约增加了 1 倍。这

一阶段,甘肃推广以全膜双垄沟播技术为核心的旱作农业技术,地膜覆盖成为农业生产领域最普遍、最有效的抗旱节水措施,地膜覆盖面积和使用量大幅增加,可视为快速增加期。2017年后,地膜覆盖面积有增有减,基本保持在 $1.87 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 左右,使用量趋于平稳后略有降低,基本处于 $1.6 \times 10^5 \text{ t}$ 左右。这一阶段,可覆膜耕地面积基本达到饱和,同时在农业生产中大力推广应用加厚地膜,倡导地膜减量替代措施,地膜覆盖面积和使用量趋于缓慢,可视为平缓稳定期。2011年以来,甘肃通过实施省级财政农业环保专项、中央财政农业清洁生产项目、农膜回收行动、地膜科学使用等政策措施,颁布《甘肃省废旧农膜回收利用条例》地方性法规,制定《废旧地膜回收技术规范》(DB62/T 2622—2015)、《聚乙烯吹塑农用地面覆盖薄膜》(DB62/T 2443—2019)等地方标准,建立完善废旧地膜回收利用体系,地膜回收利用率稳步提高,农田地膜残留现象明显改善^[7-8]。与地膜使用量相对应,2011年后,地膜回收量呈快速增加、平稳后先降低后略增加的特点,由2011年的 $4.57 \times 10^4 \text{ t}$ 提高到2022年的 $1.45 \times 10^5 \text{ t}$ 。地膜回收利用率自2011年以来呈现持续上升趋势,2011年仅为57.1%,2017年提高至80.0%,此后连续6年稳定在80%以上,2022年达到84.72%,其原因是2011年以来甘肃综合运用法制、行政、市场和技术手段,大力防控治理废旧地膜残留,废旧地膜回收与资源化利用水平得到快速发展。

地膜残留量是衡量农田残膜污染的最主要指标,是长期覆膜种植土壤中的残膜量化值^[9]。据监测调查^[10],2013年甘肃地膜年残留总量 $4.46 \times 10^4 \text{ t}$,田间地膜综合残留系数为 $4.64 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。目前,虽然有一些文献对甘肃地膜残留状况开展了调查研究,但主要集中在某一特定区域,样本数量相对较少,且未深入开展地膜残留影响因素研究和地膜残留等级划分评价,尤其是全省范围内的地膜残留状况调查尚少见报道^[11-13]。为此,本研究通过在甘肃全省主要覆膜地区布设样地,调查地膜残留状况,分析地膜残留分布,揭示主要影响因素,为进一步做好地膜残留污染防治治理提供支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区农业条件概况

甘肃位于 $32^\circ 31' \sim 42^\circ 57' \text{ N}$ 和 $92^\circ 13' \sim 108^\circ 46' \text{ E}$,地处黄土高原、内蒙古高原和青藏高原交汇处,西秦岭山地边缘,地貌以高原和山地、戈壁等为主,地势自西南向东北倾斜,海拔1000~3000 m。年日照2487.5 h,年平均气温 $6 \sim 19^\circ \text{ C}$,寒区旱区占总面积的95%以上;年均降水量仅300 mm,且时空分布严重不均,70%的降水集中在7—9月。高寒和干旱是长期制约甘肃农业生产和农村经济发展的最大瓶颈^[14-15]。

1.2 残膜样品采集处理

残膜样品采集涉及14个市(州)的81个县(市、区)及兰州新区,共布设960个样地(图1),基本涵盖

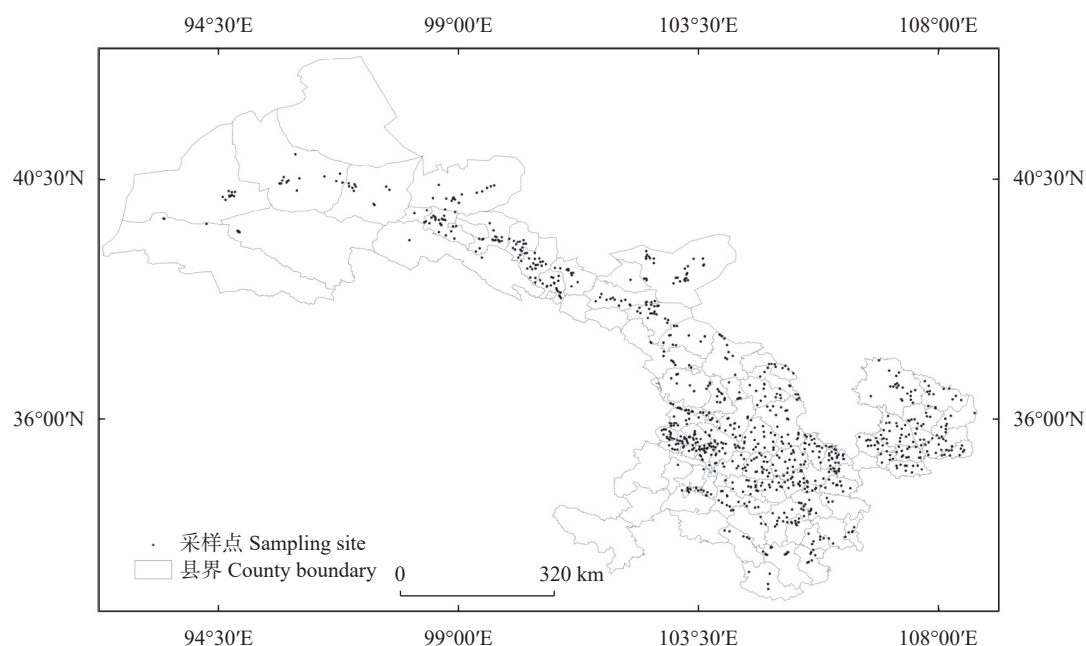


图1 甘肃省农田地膜残留调查样地分布

Fig. 1 Distribution of survey sampling sites for residual plastic film in farmland of Gansu Province

了全省所有覆膜县(市、区)的农田地块。样品采集于2021年9月覆膜作物收获后、整地前进行,采样时揭除当季地表覆盖地膜。通过GPS定位仪确定样地地理位置,记载采样地块归属镇村地点。根据地块面积大小和形状,选用“对角线”“梅花点”或“蛇形线”采样法,每个样地选取5个样方,样方为1 m×1 m,采样深度30 cm。用铁锹将表层土壤取放在帆布上,根据农业农村部生态总站《全国农田地膜残留监测方案》建议,用网孔规格为10目的筛子人工过筛,拣出肉眼可见的残留地膜,放入已编号的塑料自封袋,回填土壤恢复农田原貌。将收集到的残膜样品带回实验室,放入水中浸泡1 h后去除附着在残膜上的泥土和杂物,再用微波清洗仪清洗30 min,取出后用滤纸吸去残膜上的水分,在阴凉干燥处自然晾干后用万分之一天平称量至恒重,记录残膜质量。

1.3 样地基本信息调查

在残膜样品采集的同时,对样地基本信息进行调查,主要包括覆膜年限、覆膜作物、农户类型、距村庄距离等信息。由调查数据可知,960个样地覆膜年限在1~44 a,覆膜作物以玉米、马铃薯、蔬菜为主,覆膜比例在40%~100%,地膜使用厚度 ≥ 0.01 mm,回收利用率基本都在80%以上。农户类型包括一般农户、种植大户、合作社,以一般农户最多,合作社次之,种植大户最少。样地距村庄距离基本在1~3 km,其中 ≤ 1 km、1~2 km、 ≥ 2 km点位占比分别为62.9%、25.7%、11.3%,土壤类型有黏土、砂土和壤土,点位占比以壤土分布最多(72.8%),黏土次之(17.2%),砂土分布最少(10%)。

1.4 地膜残留量计算和污染评价

将每个样地所有样方的地膜残留量相加求平均值为该调查样地的地膜残留量。运用Kruskal-Wallis方差统计分析数据,其检验统计量(H)为:

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N+1) \quad (1)$$

式中: R_i 为样本 i 的秩和, k 为总体个数, N 为所有样本个体总数, n_i 为样本 i 的个体数。

采用地理探测器计算地膜残留影响因素的影响统计值(q 值,表示解释 $100 \times q\%$ 的因变量,值域为 $[0, 1]$),分析地膜残留量空间变异的主导因素及其交互作用^[16]。其表达式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (2)$$

式中: $h=1, \dots, L$ 是变量 Y 或因子的分层; N_h 和 N 分别是层 h 和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别是分层 h 和

全区 Y 值的方差; SSW 和 SST 分别是层内方差之和 and 全区总方差。

依据《农田地膜残留量限值及测定》(GB/T 25413—2010)标准(待播农田耕作层内地膜残留量限值应 $\leq 75.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)评估研究区地膜残留水平。参照《农田地膜残留监测与评价技术规范》(DB37/T 4176—2020)对研究区地膜残留进行等级划分,依次为:清洁阈值为 $<75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,轻度污染阈值为 $75 \sim 120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,中度污染阈值为 $120 \sim 270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,重度污染阈值为 $>270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

1.5 数据处理

采用Excel 2010、SPSS27.0、GeoDetector软件对数据进行统计分析,ArcGIS 10.2.2、GraphPad 9.5软件进行图形绘制。文中数据为中位数、上下四分位数表达形式。

2 结果与分析

2.1 地膜残留空间分布情况

参照《农田地膜残留监测与评价技术规范》(DB37/T 4176—2020),研究区地膜残留量等级划分情况如图2所示,其中:地膜残留量 $<75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的清洁阈值样地有937个,占比达97.6%,各县(市、区)均有分布;地膜残留量为 $75 \sim 120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的轻度污染阈值样地有17个,占比为1.8%,其中玉门市1个、金塔县5个、肃州区4个、高台县2个、临泽县2个、永靖县1个、泾川县1个、华池县1个;地膜残留量为 $120 \sim 270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的中度污染阈值样地6个,占比仅0.6%,其中嘉峪关市1个、肃州区3个、金塔县1个、永登县1个;地膜残留量大于 $270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的重度污染阈值样地为零。达到轻度、中度污染阈值的23个样地中有19个位于酒泉、嘉峪关、张掖3市。

受种植模式、耕作方式等因素的影响,农田耕层土壤地膜残留量空间差异有所不同。调查结果表明,从样地看,960个样地地膜残留量分布在 0.02 (康县碾坝镇安家坝村一社)~ 204.75 (肃州区三墩镇中渠村4组) $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间。各样地都有不同程度的地膜残留,且样地之间差异很大,调查样地中地膜残留量中位数为 $12.96 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。从县域看,81个县(市、区)地膜残留量较大的5个县(区)分别是金塔县 $[68.54(21.26 \sim 81.04) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}]$ 、文县 $[67.88(65.60 \sim 69.25) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}]$ 、东乡县 $[61.56(14.47 \sim 68.97) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}]$ 、肃州区 $[55.52(25.00 \sim 101.89) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}]$ 和瓜州县 $[50.60(48.30 \sim 54.59) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}]$,较小的5个县(区)分别是徽县 $[2.64(1.79 \sim 10.97) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}]$ 、凉州区 $[2.88(2.31 \sim$

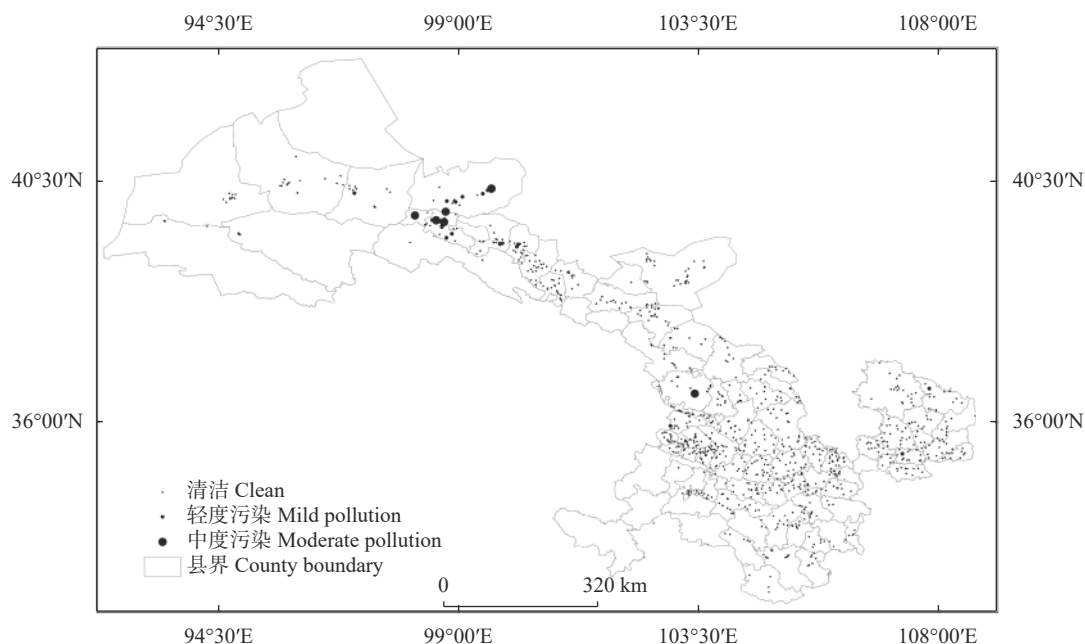


图 2 甘肃省农田地膜残留污染等级空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of residual pollution levels of plastic film in farmland of Gansu Province

3.50) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、皋兰县 [2.07 (1.75~2.77) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$]、白银区 [1.18 (0.92~1.32) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$] 和康县 [0.02 (0.02~0.02) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$]。从市域看, 14 个市(州)及兰州新区地膜残留量较大的 3 个市(州)分别是嘉峪关市 [61.32 (22.38~95.60) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$]、酒泉市 [48.24 (23.06~57.24) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$] 和临夏州 [31.84 (15.26~44.44) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$]、较小的 3 个市分别是武威市 [9.92 (3.30~11.44) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$]、陇南市 [8.25 (4.61~14.20) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$] 和兰州市 [5.62 (2.78~22.51) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$]。由于数据量较大, 其他样点、县(市、区)、市(州)地膜残留量不再一一罗列。根据农业种植自然、地理和气候等条件, 将甘肃大致划分为高寒阴湿区(甘南藏族自治州、临夏回族自治州)、灌溉农业区(酒泉市、嘉峪关市、张掖市、金昌市、武威市)、雨养农业区(平凉市、庆阳市)、旱作农业区(兰州市、兰州新区、白银市、定西市)和山地农业区(天水市、陇南市) 5 个农业区域。从图 3 可知, 地膜残留量分别为高寒阴湿区 23.93 (13.17~40.89) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、灌溉农业区 20.88 (10.67~47.38) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、雨养农业区 15.98 (6.83~28.22) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、旱作农业区 9.48 (4.82~15.90) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、山地农业区 8.56 (5.18~14.37) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。高寒阴湿区地膜残留量中位数较高, 灌溉农业区次之但上四分位数最高, 雨养农业区地膜残留量居中, 旱作农业区、山地农业区地膜残留量比较接近且无论是中位数还是上下四分位数都最低。不同农业区域之间地膜残留量大致表现出自西向东递减的趋势。以上结果表明, 从县域、市域、区域 3 个层面来看, 甘肃农田耕层土壤地膜

残留量全部低于国家标准《农田地膜残留量限值及测定》(GB/T 25413—2010) 规定的农田耕作层内地膜残留量限值 (75 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), 均在清洁阈值范围之内。

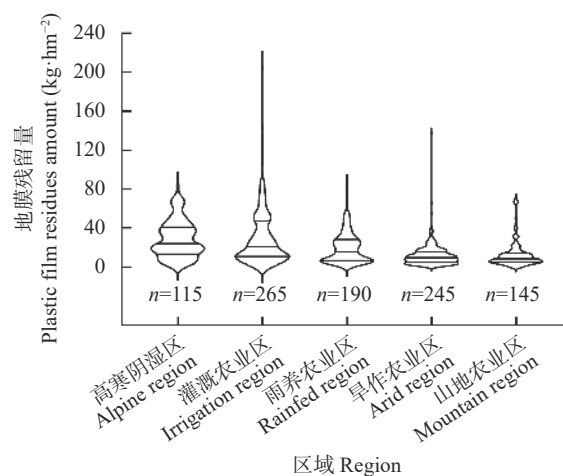


图 3 甘肃省不同农业区域的农田地膜残留量

Fig. 3 Amount of plastic film residues in farmland of different agricultural regions in Gansu Province

小提琴图的轮廓线用来展示数据的频率, 轮廓线越宽表示数据频率越高。图形中上边的横线为上四分位数, 中间的横线为中位数, 下边的横线为下四分位数。n 为样地数量。The contour of violin plot shows the frequency of the data; the wider the contour, the higher the data frequency. The upper line in the graph is the upper quartile, the middle line is the median, and the lower line is the lower quartile. n is the number of sites.

2.2 地膜残留主要影响因素

2.2.1 覆膜年限

地膜残留的主要特点是因田间地膜大量投入

且长期使用后回收不完全或不及时造成的累积结果。根据调查情况, 960个样地覆膜年份最早始于1979年, 覆膜累积年限多为10~20 a。将覆膜年限划分为 ≤ 5 a、6~10 a、11~20 a、 >20 a 4个区间, 对应的样地数分别为135、190、365、270, 地膜残留量分别为11.75 (6.38~26.74) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、11.79 (5.13~22.16) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、14.52 (7.61~28.47) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、13.60 (7.37~30.63) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 表现出随着覆膜年限延长地膜残留量增加的趋势 (图4)。尽管当覆膜年限达到20 a以上时, 地膜残留量有轻微降低, 但地膜残留量上四分位数依然最高。Kruskal-Wallis 分析结果表明, 覆膜年限6~10 a与11~20 a、 >20 a之间地膜残留量差异显著, 其中11~20 a极显著高于6~10 a ($P<0.01$), >20 a显著高于6~10 a ($P<0.05$), 其余覆膜年限之间地膜残留量差异不显著。

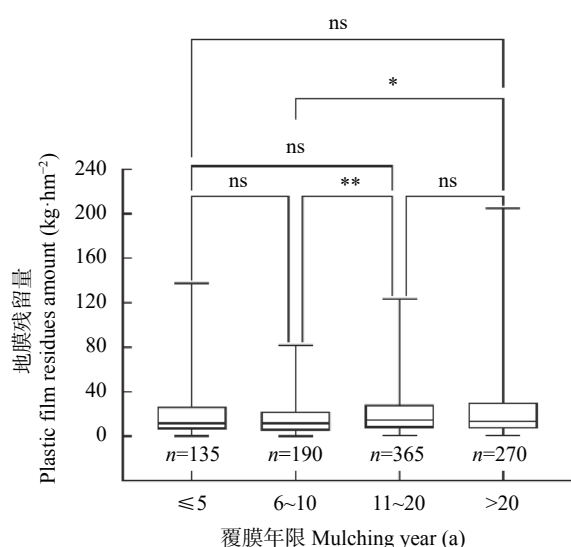


图4 甘肃省农田不同覆膜年限对地膜残留量的影响
Fig. 4 Effect of different mulching years on plastic film residues amount in farmland of Gansu Province

箱线图的箱体底边为下四分位数, 顶边为上四分位数, 中间横线为中位数, 箱体两端的线条为最大值和最小值。ns、*、**分别表示不同覆膜年限之间无差异、在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平差异显著。 n 为样地数量。The bottom line of the box is the lower quartile, the top line is the upper quartile, the middle line is the median, and the bars at both ends of the box are the maximum and minimum values. ns, * and ** indicate no significant, significant differences at $P<0.05$ level and $P<0.01$ level between different mulching years, respectively. n is the number of sites.

2.2.2 种植作物类型

不同作物因栽培方式、覆膜比例不同, 残膜回收难易度不同, 地膜残留量也不同。调查结果显示, 960个样地种植作物类型包括玉米、马铃薯、小麦、胡萝卜 (*Daucus carota* var. *sativa*)、甘蓝 (*Brassica oleracea* var. *capitata*)、当归 (*Angelica sinensis*)、黄芪 (*Astragalus membranaceus*)、胡麻 (*Sesamum indicum*)、

百合 (*Lilium brownii* var. *viridulum*)、制种类等作物。不同作物的覆膜比例差别也较大, 介于40%~100%。依据覆膜的种植作物类型差异, 大致将其归类为玉米、马铃薯、小麦、露地蔬菜、设施蔬菜、经济作物、中药材、制种作物等8个类别, 对应的样地数分别为519、101、37、138、10、88、55、12, 地膜残留量分别为13.61 (7.18~29.92) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、12.62 (7.46~23.26) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、14.65 (5.99~18.68) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、12.55 (6.41~25.16) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、3.26 (1.39~4.56) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、13.75 (7.15~35.88) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、11.27 (7.00~19.40) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、23.22 (12.42~53.73) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (图5)。其中制种作物残留量中位数和上四分位数均最大, 设施蔬菜残留量中位数和下四分位数最小, 前者残留量中位数达到后者的7倍, 其余类别相互之间残留量相差不大。Kruskal-Wallis 分析结果表明, 除小麦与设施蔬菜地膜残留量无显著差异外, 制种作物、经济作物、玉米、马铃薯、露地蔬菜、中药材与设施蔬菜地膜残留量之间差异显著, 均高于设施蔬菜 ($P<0.05$)。

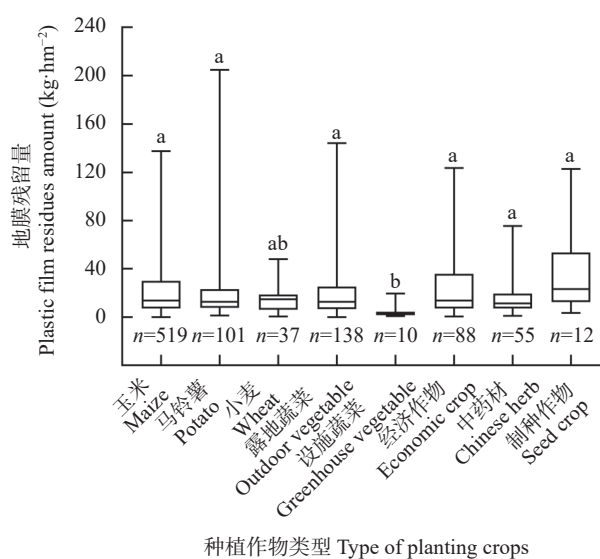


图5 甘肃省农田不同作物类型对地膜残留量的影响
Fig. 5 Effect of different types of planting crops on plastic film residues amount in farmland of Gansu Province

箱线图的箱体底边为下四分位数, 顶边为上四分位数, 中间横线为中位数, 箱体两端的线条为最大值和最小值。不同小写字母表示不同种植作物类型之间在 $P<0.05$ 水平差异显著。 n 为样地数量。The bottom line of the box is the lower quartile, the top line is the upper quartile, the middle line is the median, and the bars at both ends of the box are the maximum and minimum values. Different lowercase letters indicate significant differences among different planting crop types at $P<0.05$ level. n is the number of sites.

2.2.3 种植户类型

不同种植户类型因对耕地管理精细度不同, 地膜残留量有所不同。根据调查情况, 960个样地种植

户类型可分为一般农户、种植大户、合作社 3 类, 样地占比分别为 86.9%、5.6%、7.5%, 其地膜残留量分别为 12.78 (6.67~26.51) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、11.40 (9.50~18.78) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、18.62 (9.07~32.92) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。合作社样地残留量最大, 是一般农户的 1.5 倍, 是种植大户的 1.6 倍, 其残留量上四分位数也最高(图 6)。Kruskal-Wallis 分析结果表明, 一般农户与种植大户、种植大户与合作社之间地膜残留量无差异, 合作社地膜残留量显著高于一般农户 ($P<0.05$)。

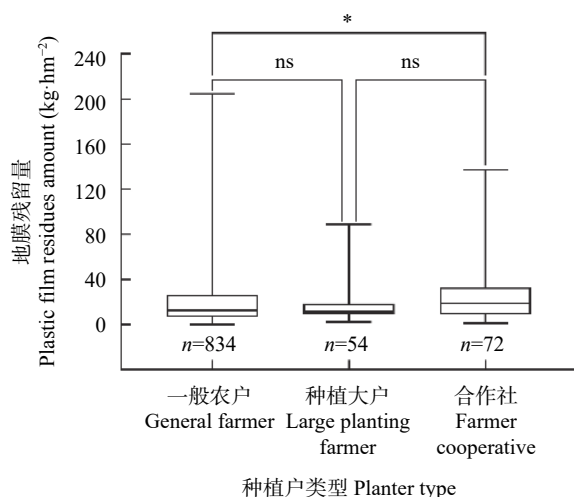


图 6 甘肃省农田不同种植户类型对地膜残留量的影响
Fig. 6 Effect of different planter types on plastic film residues amount in farmland of Gansu Province

箱线图的箱体底边为下四分位数, 顶边为上四分位数, 中间横线为中位数, 箱体两端的线条为最大值和最小值。ns、* 分别表示不同种植户类型之间无差异、在 $P<0.05$ 水平差异显著。n 为样地数量。The bottom line of the box is the lower quartile, the top line is the upper quartile, the middle line is the median, and the bars at both ends of the box are the maximum and minimum values. ns and * indicate no significant and significant differences at $P<0.05$ level between different planter types, respectively. n is the number of sites.

2.2.4 回收方式

前茬作物收获后、后茬作物播种前种植户地膜回收方式也是影响地膜残留量的一个重要因素。调查结果表明, 农田残膜主要通过人工捡拾、人工捡拾+机械回收、机械回收 3 种方式进行离田回收, 样地个数分别为 681、232、38, 占比分别为 71.6%、24.4%、4.0%, 残膜主要还是以人工捡拾回收方式为主。3 种回收方式地膜残留量分别为 11.87 (6.40~24.24) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、16.12 (10.17~36.51) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、18.11 (11.19~38.30) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 机械回收方式下地膜残留量最高, 人工捡拾回收地膜残留量最低(图 7)。Kruskal-Wallis 分析结果表明, 机械回收与人工捡拾、人工+机械回收之间地膜残留量无差异, 人工+机械回收地膜残留量显著高于人工回收 ($P<0.0001$)。

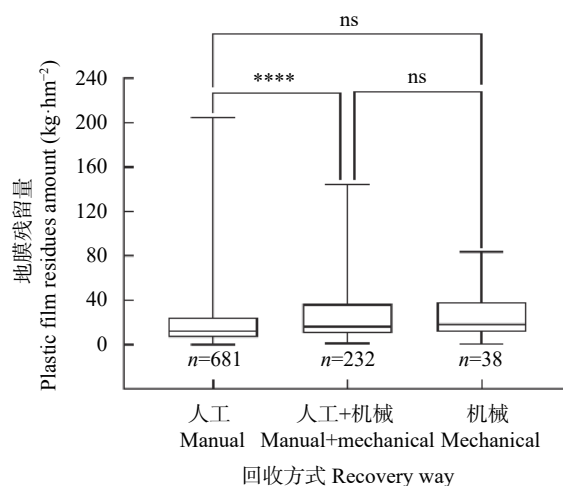


图 7 甘肃省农田不同回收方式对地膜残留量的影响
Fig. 7 Effect of different recovery ways on plastic film residues amount in farmland of Gansu Province

箱线图的箱体底边为下四分位数, 顶边为上四分位数, 中间横线为中位数, 箱体两端的线条为最大值和最小值。ns、**** 分别表示不同回收方式之间无差异、在 $P<0.0001$ 水平差异显著。n 为样地数量。共调查 960 个样地, 9 个样地调查时农户尚未揭膜。The bottom line of the box is the lower quartile, the top line is the upper quartile, the middle line is the median, and the bars at both ends of the box are the maximum and minimum values. ns and **** indicate no significant and significant differences at $P<0.0001$ level between different recovery ways, respectively. n is the number of sites. A total of 960 sample sites were surveyed, and 9 of them had not yet been uncovered by farmers during the survey.

2.3 地膜残留量空间差异驱动因子分析

根据地理探测器因子探测分析结果可知(表 1), 不同影响因子的决定力 (q 值) 存在差异。 q 值从大到小依次为种植作物类型>回收方式>覆膜年限>种植户类型。种植作物类型是影响地膜残留量空间分布的第 1 因素, 贡献率为 2.21%; 回收方式是第 2 因素, 贡献率为 2.15%; 其次是覆膜年限和种植户类型, 贡献率分别为 1.60% 和 0.69%。分析结果表明, 就上述影响地膜残留量的因素而言, 种植作物类型是造成研究区地膜残留量空间变化的主导因素。交互因子分析结果表明, 覆膜年限与种植户类型、回收方式、种植作物类型, 种植户类型与回收方式、种植作物类型, 回收方式与种植作物类型两因子叠加 q 值均大于两因子 q 值之和, 表现出非线性增强交互作用, 且以种植作物类型、回收方式交互作用最大。

2.4 残膜处理去向

残膜回收后的去向决定了其是否作为资源得到再生利用。调查结果(图 8)表明, 残膜由农户清除整理后主要通过商贩到田现场收购、网点组织统一回收和农户自行以旧换新 3 种方式离田, 其中商贩到田现场收购样地 60 个、占比 6.3%, 网点组织统一回

表 1 地膜残留量空间差异影响因子及交互作用探测结果

Table 1 Factor and interaction detection results of spatial difference of plastic film residues amount

$q(A)$	$q(B)$	$q(A \cap B)$	判据 Compare	解释 Explanation
覆膜年限=0.0160	种植作物类型=0.0221	覆膜年限 $\cap$ 种植作物类型=0.0612	$q(A \cap B) > q(A) + q(B)$	非线性增强
Mulching year=0.0160	Planting crop type=0.0221	Mulching year $\cap$ planting crop type=0.0612		Nonlinear enhancement
覆膜年限=0.0160	种植户类型=0.0069	覆膜年限 $\cap$ 种植户类型=0.0282		
Mulching year=0.0160	Planter type=0.0069	Mulching year $\cap$ planter type=0.0282		
覆膜年限=0.0160	回收方式=0.0215	覆膜年限 $\cap$ 回收方式=0.0499		
Mulching year=0.0160	Recovery way=0.0215	Mulching year $\cap$ recovery way=0.0499		
种植作物类型=0.0221	种植户类型=0.0069	种植作物类型 $\cap$ 种植户类型=0.0511		
Planting crop type=0.0221	Planter type=0.0069	Planting crop type $\cap$ planter type=0.0511		
种植作物类型=0.0221	回收方式=0.0215	种植作物类型 $\cap$ 回收方式=0.0774		
Planting crop type=0.0221	Recovery way=0.0215	Planting crop type $\cap$ recovery way=0.0774		
种植户类型=0.0069	回收方式=0.0215	种植户类型 $\cap$ 回收方式=0.0458		
Planter type=0.0069	Recovery way=0.0215	Planter type $\cap$ recovery way=0.0458		

$q(A)$ 、 $q(B)$ 指不同影响因子的 q 值, $q(A \cap B)$ 指两影响因子交互作用的 q 值。The $q(A)$ and $q(B)$ refer to the q values of different influencing factors, $q(A \cap B)$ refers to the q value of the interaction between different influencing factors.

收样地 508 个、占比 53.4%, 农户自行以旧换新样地 383 个、占比 40.3%。调查中没有发现随意弃置、掩埋或焚烧残留地膜等现象, 通过收购、回收、以旧换新的残膜最终转运到回收加工企业经过处理后通过再生造粒或磨成地膜粉后得到再生加工利用。

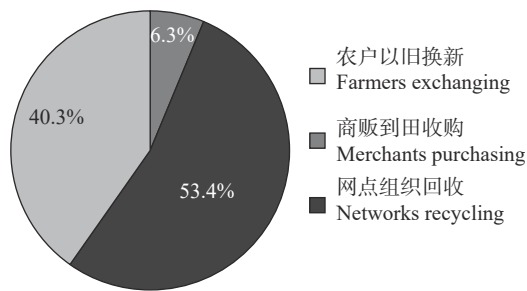


图 8 甘肃省农田残膜处理去向

Fig. 8 Treatment directions of farmland residual film in Gansu Province

共调查 960 个样地, 9 个样地调查时农户尚未揭膜。A total of 960 sample sites were surveyed, and 9 of them had not yet been uncovered by farmers during the survey.

3 结论和讨论

3.1 残留地膜分布特征

绿色循环可持续是农业发展的首要前提, 农田地膜残留污染若得不到有效的控制, 将会对耕地的生态圈埋下巨大隐患^[1-4]。开展农田地膜残留监测, 是做好地膜残留污染防控的基础性工作^[6-7]。本调查结果显示, 甘肃 960 个样地农田 0~30 cm 耕层土壤都有不同程度的地膜残留, 且地膜残留量空间变化幅度很大, 地膜残留量变幅为 0.02~204.75 kg·hm⁻², 这可能是由于种植作物类型、地膜使用量、种植模式等有区域特征, 造成地膜残留量空间差异大。地膜残留量中位数为 12.96 kg·hm⁻², 远未达到国家地膜残留量限值, 且与 2013 年调查^[8]地膜残留量 (27.62~42.26 kg·hm⁻²) 相比, 地膜残留量有所降低, 农田地膜残留

水平总体较轻。与国内部分主要覆膜地区相比, 甘肃地膜残留量低于新疆 (134.09 kg·hm⁻²)、内蒙古 (127.09 kg·hm⁻²)、贵州 (70.84 kg·hm⁻²)、河北 (36.80 kg·hm⁻²) 等地区^[17-20], 与山东 (16.51~19.84 kg·hm⁻²)、河南 (20.4 kg·hm⁻²)、四川 (16.27 kg·hm⁻²)、江西 (<15 kg·hm⁻²) 等地区接近^[21-24], 这主要是 2011 年以来, 甘肃协同推进源头防控、过程管控和末端治理, 在地膜回收利用方面探索构建了“强化源头防控、政府扶持引导、企业市场运作、行政监管推动、技术支撑保障、法制引领规范”的工作格局, 地膜残留防控治理工作取得显著成效^[9-10], 地膜回收率持续提高且近 6 年连续稳定在 80% 以上。甘肃有 97.6% 的样地地膜残留量处于清洁阈值范围, 仅有 2.4% 的样地达到轻、中度污染阈值, 且这些样地大多位于河西灌溉农业区, 这可能是由于该区域以往长期使用的地膜均为自行购买的厚度低于 0.008 mm 的超薄地膜, 且玉米、瓜类制种基地较多, 规模化经营土地普遍机械化作业程度较高, 因而地膜残留量较大, 今后在地膜残留防控中应给予重点关注, 以消除样地由轻度、中度污染转为重度污染的风险。

3.2 残留地膜影响因素

综合众多研究文献^[17-25], 覆膜年限、种植作物类型、地膜厚度是影响地膜残留量的主要因素, 土壤质地、距村庄距离、地膜回收状况等与地膜残留量也密切相关。本次调查显示, 960 个样地在农业生产中普遍使用厚度为 0.01 mm 及以上、幅宽为 1200 mm 左右的高标准地膜, 薄地膜几乎没有, 因此地膜厚度对地膜残留的影响不再分析。数据分析还表明, 不同土壤类型样地地膜残留量为黏土 [15.35 (6.02~32.33) kg·hm⁻²] > 壤土 [13.26 (7.00~25.64) kg·hm⁻²] > 砂土 [11.47 (8.17~23.65) kg·hm⁻²], 3 类土壤类型相互之间地膜残留量无显著差异 ($P > 0.05$), 这与

在张掖绿洲地区^[11]、内蒙古河套地区^[25]的研究结果相同。距村庄距离 ≤ 1 km、1~2 km、 >2 km 样地残留量分别为 13.75 (7.15~30.06) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、12.28 (7.38~22.18) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、11.86 (4.51~24.53) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 地膜残留量非常接近, 这与甘肃 2013 年调查^[8]发现农田距离村庄越远, 平均地膜残留量越大的结论不同, 其原因在于近年来甘肃健全回收网络体系, 在覆膜面积较大的乡镇基本都建有回收网点, 大部分县区还实现了村级堆储点全覆盖, 残膜捡拾后能够方便就近交售变现, 农户捡拾回收地膜的积极性和主动性大幅提高。基于以上分析结果并结合实际调查情况, 主要考量覆膜年限、种植作物类型、种植户类型、回收方式 4 个因素对地膜残留量的影响。调查发现, 地膜残留量基本呈年限越长、残留量越大的趋势, 这与已有研究结果基本一致^[1-2]。但当覆膜年限达到 20 a 以上时, 地膜残留量反而有所降低, 这可能因为地膜残留在农田里达到一定年限后, 受光照氧化和机械扰动等外力作用, 地膜碎片化为肉眼不可见形态, 难以捡拾离田。农田地膜残留污染具有隐蔽性、长期性、复杂性, 地膜是土壤中微塑料的重要来源之一, 今后应重视农田土壤微塑料检测研究^[26]。覆膜年限 ≤ 5 a 与其余较长覆膜年限间地膜残留量差异不显著, 这可能是近年来地膜质量标准逐步提高后地膜易于捡拾, 加之回收力度不断加大, 因而地膜残留量较小。不同作物地膜残留量为制种作物最大、设施蔬菜最小, 制种作物、经济作物、玉米、马铃薯、露地蔬菜、中药材与设施蔬菜地膜残留量差异显著 ($P<0.05$), 这可能是由于农户更加注重对高效益保护菜地的土壤环境精细化管理, 因此设施菜地的地膜回收力度更大, 这与甘肃^[10]、内蒙古^[25]调查结果一致。制种作物地块多处于区位优势突出的河西灌溉农业区, 样地多为制种基地, 基本属于流转土地, 经营管理者往往对流转土地耕地质量管理相对较差, 对残膜回收重视程度不够, 因而地膜残留量相对较大。不同种植户类型地膜残留量为种植大户 $<$ 一般农户 $<$ 合作社, 合作社残留量显著高于一般农户 ($P<0.05$), 其原因主要是随规模化经营发展, 流转地块多以短期合同为主, 开展地膜回收将增加成本, 合作社经营者对土壤管理比较粗放, 因而导致地膜残留较多, 而一般种植户对农田管理精细程度则较高^[27]。不同回收方式下地膜残留量以人工捡拾最低, 机械回收最高, 人工+机械回收方式下地膜残留量显著高于人工回收 ($P<0.0001$), 这可能是由于人工回收方式不仅能将大块地膜揭起, 还可以通过捡拾或耙地更加

彻底地清理小块地膜, 但机械方式往往由于机具翻耕扰动使作物根系残渣与地膜缠绕, 加大残膜破碎程度, 致使农田残膜量反而增多。通过分析影响地膜残留量空间差异的因子贡献率, 种植作物类型、回收方式、覆膜年限、种植户类型合计仅能解释地膜残留量空间变异的 6.65%, 但前三者 q 值均显著 ($P<0.05$)。地膜残留量与自然地理环境、气候水文条件、农业种植模式等密不可分, 甘肃由于各农业区域之间差异较大, 因此地膜残留量空间差异解释力较为分散, 这也提示在今后地膜残留监测中需要继续探寻更多且具有较强解释力的影响地膜残留量的因素。

3.3 残留地膜离田去向

废旧地膜是可再生利用的资源, 回收则利, 弃置则害。地膜回收加工企业是开展废旧地膜回收利用, 实现变废为宝和资源化利用的关键主体^[9-10]。此外, 规范农户回收行为并增强回收意识可降低地膜残留量^[28]。2011 年以来, 甘肃按照“政府扶持、市场运作、循环利用”的工作思路, 实行“以奖代补”“以旧换新”“以物易物”“谁生产、谁回收”等工作机制^[29], 将“农民—商贩—网点—企业”等各利益体通过市场化机制连接起来, 构建网点回收-企业加工型、商贩收购-企业加工型、农民交售-商贩和企业混合收购加工型等回收模式, 基于不同区域形成了“废旧地膜—再生颗粒—深加工产品(滴灌带, 等)”“废旧地膜—地膜粉—深加工产品(市政井盖, 等)”等资源化模式^[30], 实现了经济利益最大化, 有效防控了废旧地膜残留。全省农业环保行业业务数据显示, 至 2022 年底甘肃正常运行的农膜回收利用企业共有 132 家, 重点覆膜区域每县(市、区)至少拥有一家地膜加工利用企业, 共设有专业化回收网点 1827 个, 基本已形成“县有加工企业、乡有回收站点、村有堆放场所”的回收利用体系。本次调查结果表明, 农田残膜采取人工为主+机械为辅回收方式离田后, 基本上全部通过商贩到场收购、网点组织回收和农户以旧换新转交到回收加工企业, 进行再生加工得到资源化利用, 这说明现今农户、商贩、网点自发捡拾回收地膜的环保意识较强, 市场化回收再利用机制构建较好。但回收环节农机具应用程度还不高, 绝大部分样地主要依靠人工捡拾回收, 费时费工、效率低下, 而当前应用的农机具效率较低, 应增强残膜回收农机具的种类和功能研发应用, 提高多元性覆膜作物、种植模式等条件下地膜机械回收效率。

4 防控建议

资源节约与环境友好型农业是农业绿色可持续发展的必然趋势。覆膜种植对土壤水分和温度兼具正效应特点, 是农业生产中广泛应用的关键农艺措施, 对保障农产品供给和提高农户收益意义重大。甘肃寒旱交织的农情特点决定了地膜覆盖栽培技术将是农业生产中长期应用的一项农业技术, 伴随产生的废旧地膜势必是今后相当长一段时期内农业生产发展中需要致力解决的现实问题^[31-32]。1990年以来, 我国地膜污染防控政策经历了生产供应保障、环保意识形成、污染综合防治、残膜资源化利用4个阶段的演变后, 逐步形成了科学推广加厚高标准地膜、有序推广全生物降解膜的地膜科学使用回收防控政策^[33-34]。经过10多年的发展, 甘肃农田耕层土壤地膜残留总体上已处于清洁水平, 但也有少数点位达到残留污染等级。鉴于地膜覆盖技术应用的广泛性和模式的多样性, 基于本次调查结果, 建议以源头减量、高效回收、产品替代、机制完善为导向, 统筹做好地膜残留防控工作, 进一步减轻农田耕地地膜残留, 达到农业生态效益和经济效益双赢目标^[35-41]。1) 源头减量方面, 根据地域、气候条件、作物及种植制度, 开展传统PE地膜科学合理使用区划研究, 通过旧膜重复利用、秸秆覆盖种植、栽培方式优化等措施解决长时间应用地膜覆盖技术问题, 从源头减少地膜田间投入量。2) 高效回收方面, 加快加厚高标准地膜推广力度, 强化农机农艺融合技术攻关, 研发具有膜杂分离好、仿地性能强、捡净率高的地膜回收机具, 加大地膜回收机具补贴力度, 提高地膜机械化回收技术应用水平。3) 产品替代方面, 研发兼具覆盖功能性与环境包容性的全生物专用降解膜产品, 突破在生产工艺、力学性能和生产成本等方面的关键技术瓶颈, 基于成熟的试验示范在特定区域、特定作物上稳步推广应用, 发挥替代传统PE地膜的生产潜力。4) 机制完善方面, 创新监督管理制度, 通过收取地膜回收保证金, 将惠农补助资金、农业用水、村集体经济分红与地膜回收挂钩等, 规范土地流转和制种地块种植经营主体大户在农业生产中的地膜回收行为, 有效遏制其对耕地“只用不管”的现象。

参考文献 References

- [1] 严昌荣, 何文清, 刘爽. 中国地膜覆盖及残留污染防控[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 43-52
- YAN C R, HE W Q, LIU S. Application of Mulch Films and

- Prevention of Its Residual Pollution in China[M]. Beijing: Science Press, 2015: 43-52
- [2] 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
- [3] 张金瑞, 任思洋, 戴吉照, 等. 地膜对农业生产的影响及其污染控制[J]. 中国农业科学, 2022, 55(20): 3983-3996
- ZHANG J R, REN S Y, DAI J Z, et al. Influence of plastic film on agricultural production and its pollution control[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(20): 3983-3996
- [4] 王敬国. 农用化学物质的利用与污染控制[M]. 北京: 北京出版社, 2001
- WANG J G. Utilization and Pollution Control of Agricultural Chemicals[M]. Beijing: Beijing Publishing House Group, 2001
- [5] 孙多鑫, 李福. 甘肃省地膜覆盖栽培技术发展探讨[J]. 中国农业推广, 2011, 27(7): 19-21
- SUN D X, LI F. Discussion on the development of plastic film mulching cultivation techniques in Gansu Province[J]. *China Agricultural Technology Extension*, 2011, 27(7): 19-21
- [6] 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
- ZOU X Y, NIU W Q, LIU J J, et al. Potential risks of plastic film residuals on soils and crops: a review[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, 36(7): 47-54
- [7] 刘建水, 王莉, 杨洁梅, 等. 除农田“白色”污染 迎农业“绿色”时代——甘肃省农膜回收情况调查[J]. 农村工作通讯, 2017(22): 37-40
- LIU J S, WANG L, YANG J M, et al. Eliminating the “white” pollution of farmland and facing the “green” era of agriculture — Investigation on agricultural film recycling in Gansu Province[J]. *Rural Work Communication*, 2017(22): 37-40
- [8] 马翠玲, 吴川会. 转变农业发展方式 提高农膜回收利用率的甘肃实践[J]. 再生资源与循环经济, 2018, 11(5): 13-16
- MA C L, WU C H. Changing the agricultural development mode and improve the recycling efficiency of agricultural film in Gansu[J]. *Recyclable Resources and Circular Economy*, 2018, 11(5): 13-16
- [9] 哈斯图亚, 陈仲新. 农田覆膜效益、环境影响与监测研究进展分析[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(4): 1-8, 16
- HASITUYA, CHEN Z X. Effects of plastic-mulching on agricultural production and environmental protection[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2017, 38(4): 1-8, 16
- [10] 马彦, 杨虎德. 甘肃省农田地膜污染及防控措施调查[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(4): 478-483
- MA Y, YANG H D. Investigation on pollution caused by mulching plastic film in Gansu Province and the counter-measures[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2015, 31(4): 478-483
- [11] 杜泽玉, 孙多鑫, 杨荣, 等. 张掖绿洲农田地膜残留量分布特征及影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(12): 2789-2797
- DU Z Y, SUN D X, YANG R, et al. Spatial distribution

- characteristics and influencing factors of plastic film residue in Zhangye Oasis[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(12): 2789–2797
- [12] 侯康锋, 王宁. 庆阳市农田废旧地膜残留监测研究[J]. 农业与技术, 2020, 40(9): 115–118
HOU K F, WANG N. Study on monitoring of waste plastic film residue in farmland in Qingyang City[J]. *Agriculture and Technology*, 2020, 40(9): 115–118
- [13] 张光全, 张海强, 王平生, 等. 榆中县农田地膜残留现状调查[J]. 甘肃农业科技, 2020(6): 39–43
ZHANG G Q, ZHANG H Q, WANG P S, et al. Investigation on present situation of farmland plastic film residues in Yuzhong County[J]. *Gansu Agricultural Science and Technology*, 2020(6): 39–43
- [14] 凡炳文, 陈文. 甘肃省水资源及其演变趋势分析[J]. 水资源与水工程学报, 2006, 17(4): 78–82
FAN B W, CHEN W. Analysis on water resources evolution trend in Gansu Province[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2006, 17(4): 78–82
- [15] 卓玛草, 袁建钰, 韩博, 等. 气候变化对甘肃省雨养农业区玉米种植区划的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(2): 211–219
ZHUO M C, YUAN J Y, HAN B, et al. Impact of climate change on maize-planting zoning in rainfed agricultural area of Gansu Province[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021, 39(2): 211–219
- [16] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116–134
WANG J F, XU C D. Geodetector: principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116–134
- [17] 牛瑞坤, 王旭峰, 胡灿, 等. 新疆阿克苏地区棉田残膜污染现状分析[J]. 新疆农业科学, 2016, 53(2): 283–288
NIU R K, WANG X F, HU C, et al. Analysis of the current situations of plastic films residue pollution of cotton field in Xinjiang Aksu area[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2016, 53(2): 283–288
- [18] 尹少媛, 赵宝平, 米俊珍, 等. 内蒙古农田耕层土壤地膜残留现状及发展趋势[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(9): 1985–1992
YIN S Y, ZHAO B P, MI J Z, et al. Current scenario and future trends of plastic film residue in farmland topsoil in Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(9): 1985–1992
- [19] 李亮亮, 代良羽, 高维常, 等. 贵州省典型覆膜耕地残膜赋存特征及影响因素[J]. 生态环境学报, 2022, 31(11): 2189–2197
LI L L, DAI L Y, GAO W C, et al. The occurrence characteristics and influencing factors of residual mulching film of typical farmland with plastic film in Guizhou Province[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(11): 2189–2197
- [20] 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
ZHANG D, HU W L, LIU H B, et al. Characteristics of residual mulching film and residual coefficient of typical crops in North China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(3): 1–5
- [21] 王学霞, 宋宁宁, 薛颖昊, 等. 山东省花生种植区耕层土壤残膜赋存特征[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(8): 1729–1737
WANG X X, SONG N N, XUE Y H, et al. Occurrence characteristics of residual film in cultivated soil of peanut planting area in Shandong Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(8): 1729–1737
- [22] 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
GUO Z L, ZHANG X, KOU C L, et al. Status and influencing factors of residual mulching film of typical crops mulched with plastic film in Henan Province[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2016, 45(12): 58–61, 71
- [23] 黄晶晶, 庞良玉, 罗春燕, 等. 四川攀西地区地膜残留量及影响因素[J]. 西南农业学报, 2012, 25(6): 2203–2206
HUANG J J, PANG L Y, LUO C Y, et al. Amount of plastic film residues and influence factors in Panxi District of Sichuan Province[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2012, 25(6): 2203–2206
- [24] 董爱琴, 刘晖, 俞莹, 等. 江西省农田地膜残留状况研究——基于典型地块样方调查数据[J]. 江西农业学报, 2022, 34(12): 128–135
DONG A Q, LIU H, YU Y, et al. Study on residual condition of farmland plastic film in Jiangxi Province based on survey data of typical plots[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2022, 34(12): 128–135
- [25] 包明哲, 红梅, 赵巴音那木拉, 等. 内蒙古河套灌区农田地膜残留量分布特征及影响因素[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(1): 45–54
BAO M Z, HONG M, ZHAO B Y N M L, et al. Distribution characteristics and influencing factors concerning residual quantity of agricultural mulch film in Hetao irrigation area, Inner Mongolia[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(1): 45–54
- [26] 陈荣龙, 陈延华, 黄珊, 等. 陕西关中农田土壤中塑料碎片和微塑料残留及其累积特征研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(10): 1649–1658
CHEN R L, CHEN Y H, HUANG S, et al. Residues and accumulation characteristics of plastic fragments and microplastics in farmland soil of Guanzhong Plain, Shaanxi[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(10): 1649–1658
- [27] 谢天宝, 刘国勇. 农地流转背景下新疆农户残膜回收机械化技术采纳分析[J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(4): 90–98
XIE W B, LIU G Y. Study on farmers' technology adoption of mechanical residual film recycling under farmland circulation in Xinjiang[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2021, 42(4): 90–98
- [28] 王太祥, 王腾, 张朝辉. 影响农田残膜回收体系建设的关键因素识别研究[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(1): 60–67
WANG T X, WANG T, ZHANG Z H. Study on identifying critical factors affecting the construction of residual film recycling system in farmland[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2019, 40(1): 60–67
- [29] 赵记军, 唐继荣, 李崇霄, 等. 甘肃省地膜回收利用机制新探索[J]. 天津农业科学, 2019, 25(11): 80–83

- ZHAO J J, TANG J R, LI C X, et al. Exploring and establishing mechanisms of plastic film recovery in Gansu Province[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2019, 25(11): 80–83
- [30] 赵记军, 唐继荣, 李崇霄, 等. 废旧地膜回收与综合利用典型模式及发展建议[J]. *现代农业科技*, 2018(4): 155–156, 159
- ZHAO J J, TANG J R, LI C X, et al. Typical modes and development suggestions for waste plastic film recycling and comprehensive utilization[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2018(4): 155–156, 159
- [31] 严昌荣, 戚瑞敏, 薛颖昊, 等. 甘肃省中东部农户地膜应用及回收现状[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(15): 211–216
- YAN C R, QI R M, XUE Y H, et al. Application and recovery of plastic mulching film by farmers in central and eastern Gansu Province[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(15): 211–216
- [32] 刘帅, 沈兴兴, 张震, 等. 基于成本效益分析的地膜回收政策研究——以甘肃省景泰县为例[J]. *中国农业资源与区划*, 2018, 39(3): 148–154
- LIU S, SHEN X X, ZHANG Z, et al. Study on plastic film recycling policy based on cost-benefit analysis — A case study of Jingtai County in Gansu Province[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2018, 39(3): 148–154
- [33] 靳拓, 薛颖昊, 张明明, 等. 国内外农用地膜使用政策、执行标准与回收状况[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(2): 411–420
- JIN T, XUE Y H, ZHANG M M, et al. Research advances in regulations, standards and recovery of mulch film[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(2): 411–420
- [34] 龙昭宇, 杨紫洪, 张康洁, 等. 中国地膜污染防治政策结构与演进——基于1990—2020年政策文本的量化分析[J]. *中国农业资源与区划*, 2022, 43(1): 141–152
- LONG Z Y, YANG Z H, ZHANG K J, et al. The structure and evolution of China's plastic film pollution prevention and control policies — Quantitative analysis based on policy texts from 1990 to 2020[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2022, 43(1): 141–152
- [35] 薛颖昊, 孙占祥, 居学海, 等. 可降解农用地膜的材料研究与应用现状[J]. *中国塑料*, 2020, 34(5): 87–96
- XUE Y H, SUN Z X, JU X H, et al. Current status of research and applications of degradable materials for agricultural soil films[J]. *China Plastics*, 2020, 34(5): 87–96
- [36] 赵记军, 于显枫, 张绪成. 地膜源头减量化技术可行路径探讨[J]. *中国农学通报*, 2021, 37(9): 57–63
- ZHAO J J, YU X F, ZHANG X C. The plastic film source reduction technology: feasible path discussion[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(9): 57–63
- [37] 高海河, 刘宏金, 高维常, 等. 作物地膜覆盖技术适宜性及其在东北春玉米上的应用[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(22): 95–107
- GAO H H, LIU H J, GAO W C, et al. The suitability of crop plastic film mulching technology and its application on spring maize in Northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(22): 95–107
- [38] 蒋德莉, 陈学庚, 颜利民, 等. 农田残膜资源化利用技术与装备研究[J]. *中国农机化学报*, 2020, 41(1): 179–190
- JIANG D L, CHEN X G, YAN L M, et al. Research on technology and equipment for utilization of residual film in farmland[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2020, 41(1): 179–190
- [39] 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治[J]. *生物工程学报*, 2016, 32(6): 748–760
- YAN C R, HE W Q, XUE Y H, et al. Application of biodegradable plastic film to reduce plastic film residual pollution in Chinese agriculture[J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2016, 32(6): 748–760
- [40] 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
- XU Y M, FANG S J, MA X P, et al. Prevention and control strategy for the pollution of agricultural plastic film[J]. *Strategic Study of CAE*, 2018, 20(5): 96–102
- [41] 严昌荣, 刘勤, 何文清, 等. 我国农田地膜残留污染的解决之道在哪儿[J]. *中国农业综合开发*, 2021(10): 18–21
- YAN C R, LIU Q, HE W Q, et al. Where is the solution to the residual pollution of farmland plastic film in China?[J]. *Agricultural Comprehensive Development in China*, 2021(10): 18–21