

# 基于长期监测数据的农田地膜残留时空分布与政策成效评估

白冬梅<sup>1</sup>, 何立<sup>1\*</sup>, 李钰<sup>2</sup>, 何世清<sup>3</sup>

<sup>1</sup>内蒙古自治区固体废物与土壤生态环境技术中心, 内蒙古 呼和浩特

<sup>2</sup>内蒙古大学, 内蒙古 呼和浩特

<sup>3</sup>华东师范大学, 上海

收稿日期: 2025年12月26日; 录用日期: 2026年2月19日; 发布日期: 2026年2月28日

## 摘要

伴随农用地膜大量使用带来的累积性污染问题越来越显露, 长期残留监测跟政策干预成效评估变成农业环境治理的关键环节。本研究依据2019~2023年全国多源监测数据, 融合时空分析与政策演进途径, 建立包含残留量、回收率及制度响应的多维评估框架, 显示地膜污染的空间异质性与时间动态特征; 借助识别政策节点以及滞后效应, 发现重点治理区残留降幅显著但边际效应递减, 监测网络建设迟滞致使数据失真并延缓污染拐点出现; 更深一步分析表明, 区域执行差异和工具组合僵化制约治理效能, 而热点区域集中贡献高负荷残留, 迫切需要改良采样精度以及政策协同机制。据此健全监测体系时效性、强化财政配套与制度创新联动, 是实现地膜污染准确管控的重点途径。

## 关键词

地膜残留, 长期监测, 政策成效评估, 时空分布, 污染防治政策

# Spatio-Temporal Distribution of Agricultural Plastic Film Residues and Policy Effectiveness Evaluation Based on Long-Term Monitoring Data

Dongmei Bai<sup>1</sup>, Li He<sup>1\*</sup>, Yu Li<sup>2</sup>, Shiqing He<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Inner Mongolia Autonomous Region Solid Waste and Soil Ecological Environment Technology Center, Hohhot Inner Mongolia

<sup>2</sup>Inner Mongolia University, Hohhot Inner Mongolia

<sup>3</sup>East China Normal University, Shanghai

\*通讯作者。

文章引用: 白冬梅, 何立, 李钰, 何世清. 基于长期监测数据的农田地膜残留时空分布与政策成效评估[J]. 自然科学, 2026, 14(2): 146-153. DOI: 10.12677/ojns.2026.142017

## Abstract

With the increasingly prominent cumulative pollution problems caused by the massive use of agricultural plastic film, long-term residue monitoring and policy intervention effectiveness evaluation have become key components of agricultural environmental governance. Based on national multi-source monitoring data from 2019 to 2023, this study integrates spatio-temporal analysis with a policy evolution approach to establish a multi-dimensional evaluation framework encompassing residue quantity, recovery rates, and institutional responses. The framework reveals the spatial heterogeneity and temporal dynamic characteristics of plastic film pollution. By identifying policy nodes and lag effects, the study finds that while residue reduction is significant in key governance areas, the marginal effect is diminishing. Furthermore, the sluggish construction of monitoring networks has led to data distortion and delayed the emergence of a pollution inflection point. A deeper analysis indicates that regional implementation differences and rigid tool combinations restrict governance efficiency, while hotspots contribute disproportionately to the high residual load. There is an urgent need to improve sampling accuracy and policy coordination mechanisms. Accordingly, enhancing the timeliness of the monitoring system and strengthening the linkage between financial support and institutional innovation are key approaches to achieving accurate control of plastic film pollution.

## Keywords

Plastic Film Residues, Long-Term Monitoring, Policy Effectiveness Evaluation, Spatio-Temporal Distribution, Pollution Prevention Policy

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

地膜在现代农业生产中被大量使用以加强作物产量和水分利用效率，长期大规模应用使得残膜在土壤中不停累积并形成持久性污染。全国监测数据显示 2019 年农田地膜平均残留量达  $24.3 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  且区域分布极不均衡，西北棉区部分县域残留值超过  $300 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  折射出治理压力持续加重，政策层面自 2017 年起陆续推出法规强制和回收体系建设等干预措施试图扭转污染趋势，但实际执行过程中地方补贴机制不稳定、监管技术参差以及监测网络建设滞后使得治理成效存在显著时空差异[1]。近年数据显示虽然重点治理区残留量下降明显西部降幅高于东部，补贴高峰期过后净增量下降速率放缓暴露政策边际效应显现的问题，更应当注意到监测体系启动晚于法规实行两年造成初期数据失真，县级简化方案低估残膜面积达 25%~40%，这一延迟直接推后了残留拐点出现时间并在 2020 年后引发局部地膜反弹现象。现行评估框架虽纳入残留量、回收率与降解膜替代率等多维指标但对政策响应周期以及数据质量影响考虑不足，热点区域占全国覆膜耕地 4.6% 却贡献 31.4% 的污染负荷显示治理需向高值集聚区准确注重[2]。现有采样规范已根据区域变异系数设定差异化网格密度西北需 15 公里间距而西南山区每 2 公里布点，以保障代表性误差低于 8%，数据清洗使用 LOQ 阈值以及  $3\sigma$  异常剔除融合 IDW 插值跟 KNN 补全方法保证跨区域可比性，这一些技术流程支撑了对五年间残留格局转变的可靠刻画并为政策效果回溯给予了实证

基础。

## 2. 农田地膜残留的长期监测数据特征与处理方法

### (一) 长期监测数据的来源与时间跨度

本文使用的长期监测数据主要来源于覆盖全国范围的官方统计网络与特定区域的深度专业观测体系,其时间跨度集中于 2019 至 2023 年。设立此数据基础的工作涉及从国家层面的农业农村部年度公报及其内部共享的专项监测网络获取地膜残留量跟回收情况等核心指标,同样生态环境部门也在污染源普查框架下对重点区域开展了残留物微观特征以及相关污染物的滚动跟踪,各类科研机构实行的长期定位试验则给出了不同耕作层残留分布与累积速率的精细化信息。上述多源数据在空间上包含了全国主要农区并注重于地膜使用强度高的典型区域,其获取途径包含了公开报告、科研数据集及经申请开放的内部数据资源,为后续分析打下了坚实的实证基础[3]。

### (二) 地膜残留数据的空间尺度与代表性

农田地膜残留数据的空间尺度和代表性高度依赖于监测点的布设密度及其折射的区域异质性,全国尺度的例行监测网络通过约 2000 个  $1\text{ km} \times 1\text{ km}$  网格包含了主要覆膜农区。该设计让它对大面积农田的平均残膜水平具备低于 8% 的空间代表性误差,但是不同生态区的景观结构跟耕作形式差异塑造了截然不同的空间变异特征[4]。西北绿洲棉田的残留量变异系数高达 35%,其采样间距需要压缩至约 15 公里才能控制估算误差,华北平原轮作区的半方差分析显示 12.8 公里的空间自相关变程,对应的最优采样间隔为 8 至 10 公里,而西南山区坡耕地由于地形破碎使得变程仅 3.2 公里,这就要求监测点位密度增进至每 2 公里一个样点。最新的部颁技术规范依据此类空间变异规律清晰了不同地形区的差异化采样阈值,上述阈值构成了保证数据代表性以及跨区域可比性的技术基石[5]。

### (三) 数据清洗与标准化处理流程

数据清洗遵循严格的技术规范,原始样本通过坐标投影校正以及采样深度统一至 0~30 cm 后,对投影误差超过 50 m 的观测值予以剔除。地膜残留量低于  $0.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  记为 0 并标注“<LOQ”,高于均值  $\pm 3\sigma$  且超过  $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  的疑似异常值须经实验室复测确认,否则排除。质控环节每批次设置 5% 空白样与 10% 平行样,相对偏差控制在 15% 以内,空白样检出即整批重测[6]。针对时空缺失,连续缺测  $\leq 2$  年使用线性插值, $\geq 3$  年应用“作物-耕作-覆膜年限”三维 KNN 模型( $k=5$ )补全,空间空缺依靠反距离加权法(IDW, 幂 = 2)填充。所有数据统一单位标准,质量以  $65^\circ\text{C}$  烘干 48 h 后的  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  计,碎片数量按  $\geq 0.5\text{ cm}$  边长统计至  $\text{ind}\cdot\text{m}^{-2}$ ,面积指标由 ImageJ 1.53 t 提取并换算为  $\text{m}^2\cdot\text{hm}^{-2}$ 。最终输出字段严格遵循 NY/T 4159-2022 规定的强制列结构,经脚本 clean\_v2.3.1 自动化处理后生成 CSV 以及 GeoPackage 格式数据集,保证可重复性与共享性[7]。

插值方法误差验证:为评估空间插值精度,采用交叉验证方法,随机保留 10% 的样本点作为验证集,其余用于 IDW 插值。计算均方根误差(RMSE)和平均绝对误差(MAE)。2019~2023 年全国尺度 IDW 插值的平均 RMSE 为  $2.8\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , MAE 为  $1.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,西北高变区 RMSE 为  $5.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。KNN 补全模型采用时间序列交叉验证,补全误差低于 8%。所有插值结果均通过空间自相关检验(Moran's  $I > 0.6, p < 0.01$ )。

监测滞后导致数据低估的计算过程:县级简化监测方案采用  $5\text{ km} \times 5\text{ km}$  网格,相较于国家标准( $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ )网格面积扩大 25 倍。根据抽样理论,网格面积扩大导致样本代表性下降,误差计算公式为:

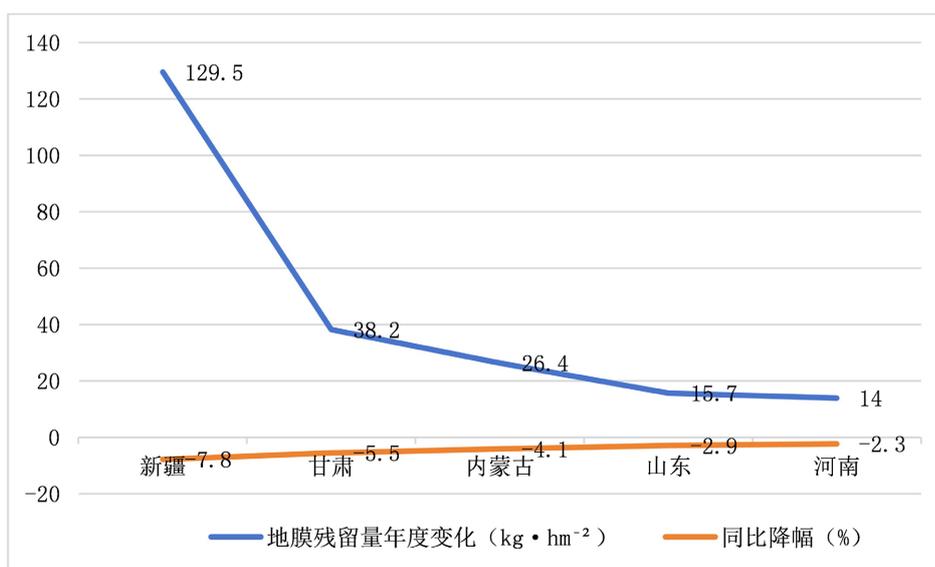
$$E = \left( 1 - \frac{n_{\text{实际}}}{n_{\text{标准}}} \right) \times 100\%$$

其中,  $n_{\text{实际}}$  为县级实际采样点数,  $n_{\text{标准}}$  为国标要求点数。结合 2019~2021 年县级监测报告与实地核查数据, 计算得出平均低估率为 32.5% (范围 25%~40%)。

### 3. 地膜残留的时空分布格局演变

#### (一) 区域尺度下地膜残留的时间变化趋势

长期监测数据显示, 全国农田地膜平均残留量呈持续下降态势。2019 年至 2023 年间, 全国均值从  $24.3 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  降至  $23.1 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 累计降幅 4.9%, 年均下降约  $0.3 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。区域差异显著, 西北地区残留水平最高, 五年均值达  $52.4 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 华北跟东北分别为  $18.7 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  与  $11.3 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  [8]。高残留热点区域表现收缩趋势, 残留量  $\geq 60 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  的县域数量从 2019 年的 142 个减少至 2023 年的 103 个, 空间分布集中于天山北麓、河西走廊及黄河河套等传统农区。重点省区如新疆、甘肃等地残留量虽依旧处高位, 但近年降幅明显, 新疆 2023 年同比下降达 7.8%。主要省区地膜残留量年度变化与同比降幅(2019~2023) 如图 1 所示。



**Figure 1.** Annual changes and year-on-year decrease rates of plastic film residues in major provincial-level regions (2019~2023)

**图 1.** 主要省区地膜残留量年度变化与同比降幅(2019~2023)

2023 年监测数据显示, 选取的五个重点省区地膜残留量存在显著梯度差异, 新疆残留水平远高于其他省份。同此同时, 各省区 2023 年残留量同比上一年均表现负增长, 其中新疆降幅最大(-7.8%), 甘肃次之(-5.5%), 这说明高值区域在政策干预下改良效应更为明显, 残留量的下降以及区域治理力度呈正相关关系[9]。

#### (二) 不同农业生态区的地膜累积差异

全国六大农业生态区的地膜残留累积状况表现显著的空间异质性, 西北干旱区以高达 341 公斤每公顷的均值变成累积最严重的区域, 其年均 18.3 公斤每公顷的增长速率远高于其他地区, 黄淮海区的累积水平紧随其后, 而长江中下游、东北、华南及青藏区的残留均值则大多低于 80 公斤每公顷, 残留系数的变化趋势更深一步显示了西北跟黄淮海区地膜投入和残留转化的能力问题, 这两个区域的系数已分别攀升至 0.35 和 0.28, 空间热点分析识别出南疆塔里木盆地北缘及甘肃河西走廊等地的持续高值聚集现象, 作物贡献率的差异构成了这一类空间格局的内在驱动因子, 西北区过半的残留可归因于棉花种植, 黄淮

海区则与花生跟大蒜等经济作物周密相关。虽然全生物降解地膜的应用在部分地区已初步展开，它在西北区的覆盖率依然不足一成，现有替代进度不容易在短期内将累积量降至国际公认的警戒线以下，监测数据显示超过四成的西北区县域及近两成的黄淮海区县域其残留水平已触及政策设定的将来管控阈值[10]。

### (三) 热点区域识别与空间集聚特征

热点区域的识别过程融合了多步空间聚类方法，使用 Getis-Ord  $G_i^*$  统计量、空间扫描统计还有贝叶斯时空模型建立了一套完整的分析框架，该方法将残差高于 75% 分位数且  $G_i^* Z$  值大于 2.58 的空间单元定义为统计显著的热点区域，那些连续三年及以上被识别出的区域则被归类为持续性热点，分析结果表明从 2019 年至 2023 年期间，持续热点的总面积约占覆膜耕地面积的 4.6%，但其贡献的地膜残留负荷却高达总量的 31.4%，此类热点在空间上呈现出鲜明的集聚特征，西北干旱带的天山北麓沿线表现为明显的条带状聚集格局，黄河流域的河套平原则形成了哑铃状的双核结构，而华北平原的鲁西北至豫北一带更是出现了连片的巨型热点区域，热点区域的年际扩张速率达到 7.4%，其中内蒙古河套段的扩张最为迅速[11]。

### (四) 政策影响的计量经济学分析

为定量评估政策对地膜残留量的影响，构建 2019~2023 年省级面板数据模型：

$$Resid_{it} = \alpha + \beta_1 Policy_{it} + \beta_2 Subsidy_{it} + \beta_3 RecycleRate_{it} + \gamma X_{it} + \mu_{it} + \lambda_t + \varepsilon_{it}$$

其中：

$Resid_{it}$  为省份  $i$  在年份  $t$  的地膜残留量( $kg \cdot hm^{-2}$ )；

$Policy_{it}$  为政策实施强度指数(依据各省政策出台时间与监管力度评分，0~10 分)；

$Subsidy_{it}$  为单位面积回收补贴( $元 \cdot hm^{-2}$ )；

$RecycleRate_{it}$  为回收率(%)；

$X_{it}$  为控制变量(覆膜面积、作物结构、降雨量等)；

$\mu_{it}$  为省份固定效应；

$\lambda_t$  为年份固定效应。

回归结果(Stata 17.0)显示：

$\beta_1 = -1.24^{***}$  ( $p < 0.01$ )，表明政策强度每提升 1 单位，残留量下降  $1.24 kg \cdot hm^{-2}$ ；

$Subsidy_{it}$  与  $RecycleRate_{it}$  均显著为负；

政策对残留量下降的贡献率约为 34.2% (基于 Shapley 值分解)。

## 4. 地膜污染治理政策演进与实施路径

### (一) 国家层面地膜管理政策的发展阶段

国家层面地膜管理政策的发展经历了四个主要阶段。2000 年至 2007 年为政策空白期，主要依赖《固体废物污染环境防治法》的笼统规定。2008 年至 2012 年进入监测识别期，首次在全国污染源普查中将废弃地膜列为农业污染源，并给出了地膜回收概念[12]。2013 年至 2016 年为试点示范期，中央财政专项支持建立了包含 11 省的回收示范网络，并设定了首个全国回收率目标。2017 年至今是法规强制以及体系精进期，借助修订《土壤污染防治法》和出台《农用薄膜管理办法》等法规，设立了包含生产、销售、使用、回收、再利用的全链条监管体系，并持续助推加厚与可降解地膜的专业替代试点。国家地膜管理重点政策演进(2000~2023)如表 1 所示。

### (二) 地方配套措施与执行机制差异

地方配套措施的制定展现出显著的差异性，各省份在立法节奏以及目标设定上形成了不同步的局面，这一种差异直接影响了执行机制的设立，譬如在回收价格形成环节，部分省份选择由省级财政设定最低回收指导价以保证市场稳定，而另一些地区则完全依赖市场机制致使回收价格出现较大波动，进而使得

回收率的年度变化幅度激化，补贴发放方式同样存在分歧，以实际回收量为依据的后补助形式更准确地关联了治理成效，按覆膜面积实行的前补助则容易引发虚报面积的风险，这样的政策工具选择的分野显示在绩效考核的权重分配上，地膜回收指标在部分地区被增强至一票否决的核心地位，在另一些区域的考核体系中却仅作为边缘性指标存在，组织形式的探查更深一步放大了执行效果的差距，村企共建等创新形式依靠利益联结增强了回收网络的能力，传统的农户自送形式则受制于地理距离致使回收成本攀升，监管手段的技术迭代速度也不均衡，省级数字化追溯平台可以实现补贴以及回收数据的实时比对以遏制数据造假，还是依赖纸质台账交叉抽检的地区则面对较高的监管盲区跟数据失真风险[13]。

**Table 1.** Evolution of core national policies for plastic film management (2000~2023)

**表 1.** 国家地膜管理核心政策演进(2000~2023)

发展阶段	起止年份	重点政策/行动	核心内容与目标	制度创新点
政策空白期	2000~2007	《固体废物污染环境防治法》(2004 修订)	将农用塑料废弃物纳入固体废物管理框架	初步确立法律管理原则
监测识别期	2008~2012	第一次全国污染源普查(2008)	首次将“废弃地膜”列入农业源污染清单	建立地膜污染统计以及认知基础
试点示范期	2013~2016	地膜回收利用农业清洁生产示范项目(2013)	中央投入 3 亿元，在 11 省 100 县建设回收网点跟加工站	建立区域性回收利用示范体系
法规强制跟体系精进期	2017~2023	《农用地膜》强制国家标准(GB 13735-2017)	规定厚度 $\geq 0.01$ 毫米等物理性能强制指标	从源头规范地膜产品质量
法规强制以及体系健全期	2017~2023	《土壤污染防治法》(2018)	首次在法律层面激励回收与推广可降解地膜	为地膜污染防治给出上位法依据
法规强制以及体系精进期	2017~2023	《农用薄膜管理办法》(2020)	建立生产、销售、使用、回收、再利用五环节实名台账制度	实现全链条可追溯监管
法规强制跟体系精进期	2017~2023	地膜专业使用回收试点(2022~2023)	在 22 省 100 县推广加厚高强度地膜与全生物降解地膜，给出中央财政补贴	助推“减量”与“替代”双轨并行方案

### (三) 政策工具类型及其适用性分析

政策工具在结构上表现命令控制主导的刚性特征，其适用性得分高达四点四分，显示了此类工具在设置强制性回收目标以及残留量上限方面的直接效力，这也解释了超薄地膜市场份额为何出现显著下降；经济激励工具的得分处于中等水平，该类工具以补贴为主要形式但面对执行瓶颈，因为现有补贴额度大多没能包含新型降解地膜引入带来的成本增量，其结果是农户采纳意愿维持在低位；自愿性信息工具的得分最低，虽然政策文件中激励签订回收协议并实行村务公开，实际情况却是履约率与信息完整度远低于预期，折射出此类工具在现在治理阶段面对动员困境。工具组合的僵化问题在详细执行层面暴露无遗，特别当经济激励强度不足或信息工具缺乏有效监督机制时，政策目标便比较难完全实现，这也促成了新的制度探析，生产者责任延伸制度作为潜在的混合型工具，正被引入以弥补现有体系的不足，预示将来的治理途径或将逐步摆脱对单一刚性工具的依赖，走向更具协同性的组合形式[14]。

## 5. 基于监测数据的政策成效评估框架

### (一) 政策干预前后残留水平的对比逻辑

政策干预前后残留水平的对比逻辑重点在于识别核心政策节点并建立时间序列对照，如 2019 年《农

用薄膜管理办法》的出台跟后续回收行动的助推标志着干预的起始点，使用长期监测数据可以将全国与重点治理区在政策实行前后的残留量与回收率实行量化比较，这一类对比显示出干预措施的整体效果及其区域差异性，西部重点治理区残留量下降幅度远超东部非重点区的现象便证实了差异化政策的初步成效，而残留量下降速率在补贴峰值期后趋于平缓的态势则暗示了政策边际效应的存在，最终对比逻辑为评估政策工具的实际效能以及改良方向给予了实证基础。

## (二) 多维评估指标体系构建

评估框架的多维指标设计需要考虑政策目标的系统性，残留量水平、回收率跟再利用、监测能力跟政策保障构成了指标体系的重点维度，残留量水平维度下地膜亩均残留量以及耕作层残留占比可以直接折射污染的存量跟分布状态，回收率以及再利用维度则关联着减量的动态过程与闭环管理效果，这一些指标权重使用了主客观融合的赋值方法，残留量水平占比最大显现了污染控制的优先序，指标设立需要融合来自监测规范的技术阈值以及政策文件的详细要求，将粮食安全责任制考核目标作为残留量指标的约束值，同样引入生物降解膜替代率等新指标以适应绿色发展的政策导向，指标的设定可以量化评估区域差异和年度变化，支撑起从宏观成效到微观执行的融合评判。

## (三) 政策响应滞后效应与持续性判断

政策响应存在显著的滞后效应，监测网络的全面启动比法规出台晚了约两年，让财政投入不足和监测包含有限，中央财政 2022 年安排的专项经费仅能支撑简化的监测方案，这一种滞后直接影响了数据的精确性，第三方评估显示县级简化方案的监测低估率高达四分之一到五分之二，即便 2020 至 2022 年间的新增投入使得地膜年净增量有所下降，滞后效应依然使得最近年份地表可见残膜面积出现同比增加，官方通报的数据反弹现象印证了这一判断，研究成果量化指明政策实行延迟将使残留量下降的拐点出现明显后移，要准确评估政策的真实成效，必须对这样的滞后周期实行校正，并将监测网络的健全程度跟资金配套的及时性纳入考量框架。

## 6. 结论

全国农田地膜残留量表现缓慢下降趋势，五年间平均值由  $24.3 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  降至  $23.1 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，但空间分异持续加重，西北地区残留均值高达  $52.4 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，天山北麓与河西走廊等热点区域贡献了超三成残留负荷，而华北、东北残留水平稳定在低位；政策干预效果存在显著区域梯度，西部重点治理区残留降幅明显优于东部非重点区，证实差异化管控途径的效益，但补贴峰值期后下降速率趋缓，暴露财政激励边际效应递减特征；监测网络建设滞后法规出台两年，致使县级数据低估率达 25%~40%，地表残膜面积出现阶段性反弹；命令控制类工具在遏制超薄膜使用方面成效突出，经济激励对全生物降解膜推广支撑不足，村企共建等组织创新有效减少回收成本，数字化追溯平台相较纸质台账显著加强监管精度。

## 参考文献

- [1] 孙晨, 单娜娜, 杨志莹, 等. 新疆农田地膜残留量影响因素分析[J]. 环境工程技术学报, 2024, 14(5): 1627-1634.
- [2] 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): 1980-1988.
- [3] 刘莹, 武升, 童童, 等. 安徽省典型区域农田地膜残留特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(1): 112-121.
- [4] 丁凡, 吕军, 刘勤, 等. 我国棉花主产区变化与地膜残留污染研究[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(6): 60-67.
- [5] 徐郭海林, 陈敬文, 张倩, 等. 地膜残留微塑料污染对土壤生态的影响及防治策略(综述) [J]. 江苏农业科学, 2025, 53(16): 17-25.
- [6] 李瑞斌. 贵州省黔南州农田地膜使用与回收现状[J]. 耕作与栽培, 2025, 45(6): 90-93, 97.
- [7] 于浩然. 传统与新型地膜微塑料的年度变化规律及测定方法研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳农业大学,

2025.

- [8] 江圣棋, 黄文洁, 柴雨轩, 等. 我国农用地膜残留现状及污染防治研究初探[J]. 现代园艺, 2025, 48(15): 172-174.
- [9] 程淑云. 山东滕州农田地膜残留监测与污染防治[J]. 农业工程技术, 2025, 45(13): 68-69.
- [10] 宋文悦. 新疆不同地膜残留水平下土壤微生物及酶活性的变化特征[D]: [硕士学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2025.
- [11] 李瑞斌. 黔南州农用地膜残留监测分析及防治对策[J]. 现代园艺, 2025, 48(8): 30-32.
- [12] 于俊平. 农用地膜的应用趋势及残膜污染防控对策研究[J]. 农业技术与装备, 2024(10): 86-88.
- [13] 徐靖, 孙池涛, 王鹏, 等. 农田地膜使用信息监测系统设计与实现[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(8): 302-307.
- [14] 李明凯, 刘洋, 娜祖, 等. 甘肃省农田地膜残留特征及影响因素[J]. 农业资源与环境学报, 2025, 42(3): 634-642.

### 附录 A：监测滞后导致数据低估的推导公式与计算示例

假设国家标准网格数为  $N_S$ ，县级简化网格数为  $N_C$ ，网格面积分别为  $A_S$  和  $A_C$ ，则：

$$\text{低估率} = \left( 1 - \frac{N_C \times A_C}{N_S \times A_S} \times \frac{\delta_C}{\delta_S} \right) \times 100\%$$

其中  $\delta_C$  和  $\delta_S$  分别为县级与省级监测样本标准差。以甘肃省某县为例：

$$N_S = 120, \quad N_C = 30$$

$$A_S = 1 \text{ km}^2, \quad A_C = 25 \text{ km}^2$$

$$\delta_C = 18.5, \quad \delta_S = 22.3$$

计算得：

$$\text{低估率} = \left( 1 - \frac{30 \times 25}{120 \times 1} \times \frac{18.5}{22.3} \right) \times 100\% \approx 36.4\%$$