



杨世琦, 韩钰, 武清涵, 黄先彤. 农田覆盖技术的演进、发展与展望[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(9): 15-26.

YANG Shiqi, HAN Yu, WU Qinghan, HUANG Xiantong. Field mulching techniques: Evolution, advances, and future perspectives[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(9): 15-26.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.09.02

农田覆盖技术的演进、发展与展望

杨世琦 韩钰 武清涵 黄先彤

(中国农业科学院 农业环境与可持续发展研究所/农业农村部农业与农村生态环境重点实验室, 北京 100081)

摘要 农田覆盖作为土壤耕作的重要技术,在提升作物生产力和保障粮食安全方面发挥了重要作用,为人类社会的发展做出了卓越贡献。本研究梳理了农田覆盖技术的创新与变革,从早期的细土覆盖、踩踏压实、耙耱保墒、干草铺盖,逐步发展为秸秆覆盖、生草覆盖、砂石铺压,直至现代的地膜与温室覆盖技术,表明地膜与温室覆盖因其显著的增温保墒效果成为当前最高效的覆盖方式,极大推动了农业生产水平的提升。然而,地膜覆盖产生的土壤残留污染及其引发的微塑料生态危机成为全球农业可持续发展面临的主要问题。在此背景下,土壤覆盖提供了有效的技术途径,在土壤水分-热量-养分协同调控与地膜污染控制方面表现出一定优势。农田覆盖技术的未来发展将深度融合物理学、化学、生态学与工程学等多学科理论与方法,在覆盖功能优化、材料革新、数字化管理、智能调控和农田覆盖理论体系等领域有望取得发展,向高质量、高效率、低碳化与智能化方向升级,形成系统性的可持续农业解决方案,为未来农业绿色发展提供更强有力的支撑,以期更好地应对全球气候变化加剧、人口增长与耕地资源紧缺等多重挑战。

关键词 农田覆盖; 土壤覆盖; 地膜覆盖; 微塑料

中图分类号 S316;S152

文章编号 1007-4333(2025)09-0015-12

文献标志码 A

Field mulching techniques: Evolution, advances, and future perspectives

YANG Shiqi, HAN Yu, WU Qinghan, HUANG Xiantong

(Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture/Key Laboratory of Agricultural and Rural Eco-Environment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract As an important technology for soil cultivation, field mulching has played a significant role in enhancing crop productivity and ensuring food security, making outstanding contributions to human societal development. This paper reviews the innovation and evolution of field mulching techniques, which has gradually developed from early practices such as fine soil mulching, trampling compaction, harrowing for moisture retention, and dry grass mulching, to the gradual development of straw mulching, living grass mulching, gravel mulching, and finally modern plastic film and greenhouse covering technologies. It demonstrates that plastic film and greenhouse covering have become the most efficient covering methods today due to their remarkable effects on temperature increase and moisture retention, greatly boosting agricultural productivity. However, the soil residual pollution caused by plastic film mulching and the resulting microplastic ecological crisis have become the main problems facing global sustainable agricultural development. In this context, soil film mulching offers an effective technical approach, and exhibits certain advantages in the synergistic regulation of soil water, heat, and nutrients, as well as in controlling plastic film pollution. The future development of field mulching technology will deeply integrate multidisciplinary theories and methods from physics, chemistry, ecology, and engineering. It is expected to achieve development in areas such as cover function optimization, material innovation, digital management, intelligent regulation, and farmland coverage theory system, upgrading towards high-quality,

收稿日期: 2025-06-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(32372235); 国家重点研发计划项目(2023YFD1900305)

第一作者: 杨世琦(ORCID:0000-0002-9134-9261), 研究员, 主要从事农田土壤耕作与生态研究, E-mail: shiqiyang@126.com

high-efficiency, low-carbon, and intelligent directions, forming a systematic sustainable agricultural solution, and providing stronger support for the future green development of agriculture, in order to better address multiple challenges such as intensifying global climate change, population growth, and the scarcity of arable land resources.

Keywords field mulching; soil film mulching; plastic film mulching; microplastic

农田覆盖技术是指通过在地表铺设覆盖物来改善耕层土壤水热环境,从而促进作物生长和提高产量的土壤耕作技术。从技术内涵来看,农田覆盖主要分为两类:一是地表覆盖,包括地膜覆盖和秸秆覆盖等;二是空间覆盖,如大棚与温室等设施农业,后者实现了作物生长空间和生育周期的全方位覆盖,具有更高的生产效能。因此,温室(大棚)属于广义上的农田覆盖。从功能价值角度,农田覆盖技术通过构建优化的作物生长微环境,在干旱与寒冷地区或季节表现出显著优势。其核心作用机制包括:抑制杂草生长、控制土壤侵蚀、改善土壤理化性质和提高水肥利用效率等,实现了经济效益与生态效益的协同提升。这一技术不仅是农业可持续发展的重要支撑,更是人类农业文明进步的显著标志。从历史维度考察,农田覆盖技术源远流长。我国古代农书中的相关记载可追溯至春秋战国时期,历经数千年的发展演变,先后出现了细

土覆盖、践踏镇压、石碾(碌碡)镇压、耙耱镇压、干草覆盖、生草覆盖、砂石覆盖等多种传统形式^[1-6,8-10],直至现代的地膜覆盖和温室(大棚)覆盖,还有最近出现的土壤覆盖与微型温室覆盖等^[11],无不表明农田覆盖技术的发展史就是一部农业现代化的演进史(图1)。然而,现代地膜覆盖技术带来的“白色污染”问题日益严峻,微塑料污染已扩散至整个生物圈,对人类健康和生态系统构成重大威胁。寻找和开发环境友好型替代覆盖技术已成为当务之急。值得注意的是,自然界本身就存在着丰富的覆盖范例,如生物结皮、非生物结皮、湿地和季节性积雪等自然现象,这些都为新型农田覆盖技术的研发提供了宝贵的启示和借鉴。展望未来,农田覆盖技术的发展需要平衡生产效益与生态安全,在继承传统智慧的基础上,融合现代科技,探索更加可持续的技术路径。这不仅关系到农业生产的持续发展,更关乎人类与自然的和谐共生。



图1 农田覆盖的演化发展

Fig. 1 The evolution and development of farmland mulching practices

1 农田覆盖技术的历史演进:传统智慧的积累与传承

早期的农田覆盖技术是通过破碎土粒、压实土层和表面盖物形成农田覆盖,达到促生增产目标,这种传统智慧中蕴含了土壤耕作思想,并不断积累传承至今。当代农业生产仍然能看到早期农田覆盖技术的形式或影子,只不过保留在工具与效率方面有很大改

进和提高。

1.1 细土覆盖

在田间大土块处的作物生长差和碎土处的生长好的启示下,出现了细土覆盖或细土耕作。细土用于覆盖农田很早,可能是最早的农田覆盖形式。细土覆土利于种子发芽和出苗,促进幼苗生长与提高作物产量,尤其低温干旱时期。细土覆盖改善了土壤水热养分状况,在古代是一项了不起的农业技

术,具有极大创新性。《吕氏春秋·辩土》记载了“于其施土,无使不足,亦无使有余。熟有耨也,必务其培。其耨也,耨者其生也必先。其施土也均,均者其生也必坚。”^[1]。播后覆盖细土,能够提高出苗率;对外露根系覆土,能够提高保苗率;对水蚀或风蚀斑块覆土,能够减少产量损失。“盐之下无丰草,大块之间无美苗”,足见古人对细土种植技术有深刻认识。随着工具改进与技术进步,精耕细作过程基本实现了农田细土化,专门的细土覆盖已再无必要,但其蕴含的耕作思想精髓得到了继承与发展。

1.2 践踏(脚踩)覆盖

践踏是赶牛羊踩踏土质疏松的农田,多在早春进行,尤其在北方。牛羊践踏使谷物种子与土壤密切接触,以利萌发;使表土坐实可减少土壤水分散失,利于保温或升温。《齐民要术》记载“杏始华荣,辄耕轻土弱土。望杏花落,复耕;耕辄藺之。草生有雨泽耕,重藺之。土甚轻者,以牛羊践之。如此则土强。此谓弱土而强之也。”^[2]。上世纪70年代的北方冬季与早春还能看到麦田赶羊情景。脚踩是用人脚踩实疏松农田,功用等同践踏,适于小片农田。古代并不是家家都有牛羊,遇到小麦拔节期,脚踩更方便。《齐民要术》事关耕作记载了“薄地,寻垄蹶之。不耕故。”,事关播种记载了“凡种,欲牛迟缓,行种人令促步,以足蹶垄底。牛迟则子匀;足蹶则苗茂。足迹相接者,亦不可烦挹也。”,事关施肥记载了“以粪五升覆之。亦令均平。又以土一斗,薄散粪上,复以足微蹶之。”^[2]。《马首农言》

也记载了与播种有关的脚踩覆盖如“以钁勾开地界而种者,每亩下子略多於耕,勾毕以足覆土踏之。勾者亦於出土时复踏之。”,与春耕有关的践踏覆盖如“春地耙三遍,牛蹄躡踏遍。”^[3]。

1.3 石磙(碌碡)镇压覆盖

石磙(碌碡)镇压覆盖使石磙或碌碡在农田滚动来压实表层,产生碎土、保温、保墒和壮苗等作用,主要用于冬小麦冬前和早春时节。镇压降低土壤孔隙度,遇冷则缓冲降温,防止麦苗受冻;遇暖则减少水分蒸发,保墒保水。在秸秆还田情况下,冬前镇压可预防根系空隙过大引发苗黄与冻害,早春镇压可预防大风引发的麦田水分蒸发与降温;小麦旺长情况下,镇压可控上促根壮苗。《马首农言》记载“碌碡压地。山田,秋宜压;春宜磨[磨似耙,木齿形如鹿角]。平田,春宜耙;秋宜犁。山田干燥,恐熟土为风吹去,来年禾稼不长,故用压、用磨。平田不须也。”和“种毕,以砵碾之。地湿,则俟乾,然后碾之。至六七日,复碾之。”^[3]。《王祯农书》也记载有“种毕,以砵碾之”^[4]。石磙与碌碡的区别是,石磙多为光滑圆柱,碌碡常有棱或凹槽;现基本上用金属体代替石质材料。石磙镇压仍然在用(图2),大多都改为机械牵引,人力或畜力已不常见。镇压要坚持“地湿不压地干压,阴天不压晴天压,早晨不压中午压”原则,否则易导致减产。碌碡压地具有操作简单、节省人力和压实效果好等特点,尤其有机械动力牵引能够省力、省时、提效和促产。

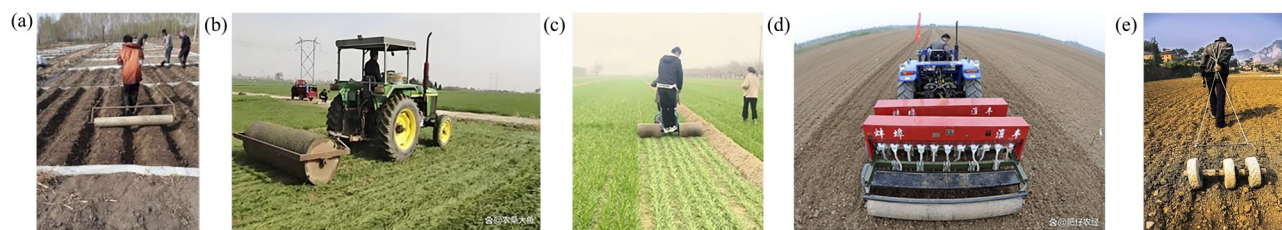


图2 石磙(碌碡)镇压覆盖^①

Fig. 2 Stone roller (field roller) compaction mulching

1.4 耙镇压覆盖

耙地主要用于碎土、平地和清除杂草,最早的耙地工具可能是木棍、树枝或石片,汉代出现了铁制耙,宋代《王祯农书》中有“耙,以木为齿,或铁为

之,用以破块、平土、覆种。”^[4],明确记载了耙的性状与功能,明清古农书也多有记载。耙主要用于北方,南方水田类似耙的农具称之为耖,齿更密,作用同耙。现在农业中耙被升级为钉齿耙、弹齿耙和圆

①图(b)和(c)来源: <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1825094216485623830&wfr=spider&for=pc>; 图(d)来源: <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1779895222624801188&wfr=spider&for=pc>; 图(e)来源: <https://www.douyin.com/note/7395385861216423209>

盘耙等,蓄力牵引被机械替代,由西方引入国内,成为大型农场重要的农机具。耨地,也称为耨地,是指人站立于用树枝或荆条编成的长方形农具(长1.5~2.0 m和宽0.5 m左右)上,即耨,在畜力或机械动力牵引下摩擦促使碎土和平土产生镇压覆盖效应(图3),以利于保墒和出苗。耨地多见于北方山区,是旱地重要的农事操作。《齐民要术》中就有“春既多风,若不寻劳,地必虚燥;秋田隰长劫反实,湿劳令地硬。”、“春耕寻手耨,秋耕待白背耨;耕欲廉,劳欲再。凡已耕耙,欲受种之地,非劳不可;谚曰:耕而不劳,不如作暴。”和“漫掷黍稷,劳亦再遍;明年,乃中为谷田。”^[2]。耙地是在翻耕土地后,使用耙将土壤进一步破碎、平整,并清除杂草和残茬,主要目的是使土壤更加细碎、疏松,便于播种和作物生长,同时也有助于保墒。因此,耨耙通常同步进行,或先耙后耨^[4]。《王

祯农书》记载“凡已耕耙欲受种之地,非耨不可”,《齐民要术》记载了“耙劳欲再,耙欲数,劳欲疾。耕而不劳,不如作暴。”^[2],《王祯农书》记载了“耙地之法,欲其土细而平,故耙必数施,而后土熟。”^[4],《农政全书》记载了“耙地者,所以碎土块、平土壤、去草根也。耙之次数,视土之刚柔而定,柔者一二次,刚者三四次。”^[5]。据考证,汉代的黄河流域就已经出现耙和耨,用磨盘或耙子使土块磨碎而更细碎和均匀,调节土壤的通透性和保水性,以利于作物生长(图3)。耨是从耨发展而来的,耨是手工碎土农具,而耨则是用畜力拖动的磨碎土块的农具。耨地是保持土壤的墒情,使表土紧实防止熟土被风吹走,以利禾稼茁壮成长。这里需要提及旋耕,它是利用旋转刀片对土壤进行破碎、混合和整地,包含耙地功能,但镇压功能不足,更大程度上像细土覆盖。

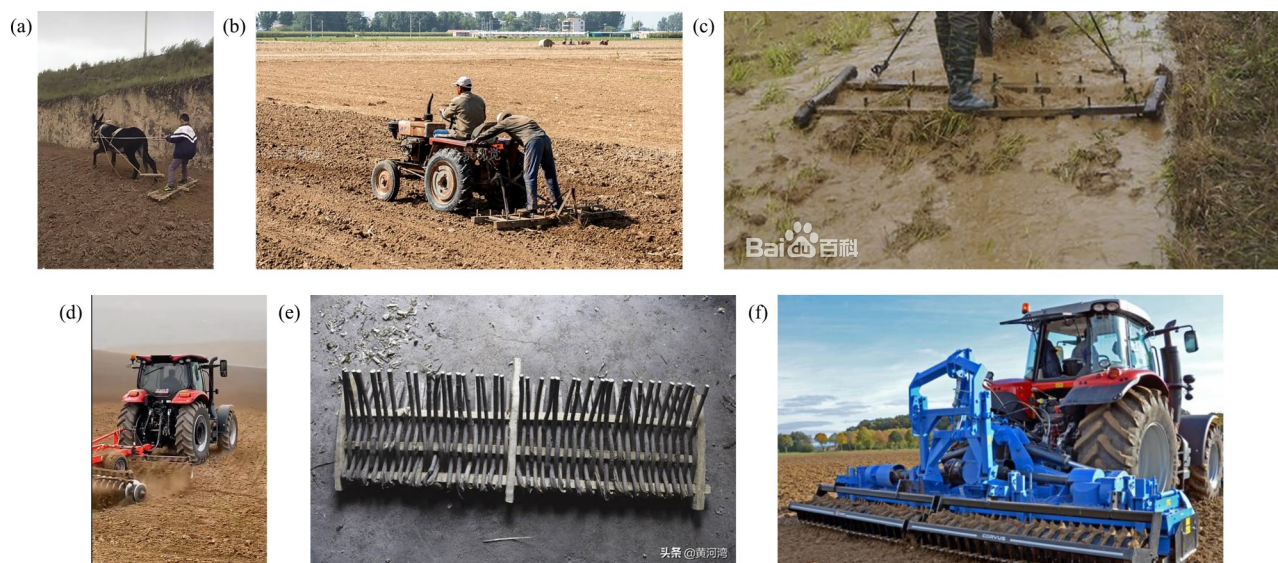


图3 耙耨镇压覆盖^①

Fig. 3 Harrowing and levelling compaction mulching

1.5 干草(草席)覆盖

干草或草席覆盖主要用于蔬菜种植,白天可遮光、防高温和降低土壤水分蒸发;夜晚保热量和防低温,尤其幼苗期(图4)。《齐民要术·种胡菜》记载“十月足霜,乃收之。取之者,乃留根,间拔令稀,以草覆上”,关于茄苗管理记载了“若旱无雨,浇水令

彻泽,夜栽之。向日以席盖,勿令见日。”^[2],《农桑衣食撮要》记载了“种芋秧…用草覆盖…种瓜菜…上用低棚盖之…种榷,冬间…粪草盖…把搂去粪草…种竺麻…以草盖…种姜…以腐草改之,六月棚盖,或插芦蔽日…”等30多种农作物和果木的覆盖栽培技术。^[6],《务本新书》记载了芥蓝栽培以草覆其根

① 图(a)来源: <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1721080746895762211&wfr=spider&for=pc>; 图(b)来源: <https://m.quanjing.com/imgbuy/QJ9132056826.html>; 图(c)来源: <https://baike.baidu.com/item/%E8%80%99/23323727>; 图(d)来源: https://mbd.baidu.com/newspage/data/videolanding?nid=sv_4878580071570329346&sourceFrom=qmj; 图(e)来源: <https://www.163.com/dy/article/FOB8TIJ30521S3LU.html>; 图(f)来源: <http://www.xbnj.net/shop/bencandy.php?fid=132&id=188>

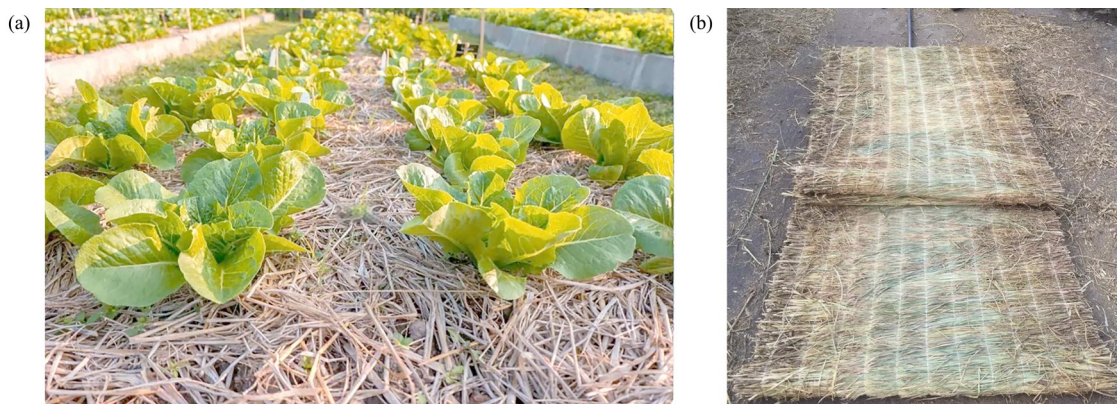
图4 干草(草席)覆盖^①

Fig. 4 Hay mulching and straw mat cover

“二月畦种,苗高…五月园枯,此菜独茂…食至冬月,以草覆其根。四月终…根又生叶,又食一年。”^[7],《植物名实图考》记载了姜栽培以席草覆盖促芽“一法用席草覆之勿令他草生,使姜芽自迸出…”、“无芽者以根在下密布田中,以稻草覆之,日曝其芽,姜瘁日浇水一次,或隔日亦可,待芽间吐发三四叶,长二、三寸即可种。”^[8],宋度宗咸淳年间的《临安志》甚至记载了覆盖保存白菜的方法“冬间取巨菜覆以草,积久而去其腐叶,黄白纤莹故名”^[9]。干草或草席覆盖已不仅仅是土壤覆盖,还有蔬菜幼苗的临地面空间覆盖,在功能上增加了地上部光照调控,可以说是大棚或温室的雏形。

1.6 砂石覆盖

砂石覆盖是用不同粒径的砾石和粗砂覆盖田面,具有明显的蓄水、保墒、增温、压碱和保持地力作用,在干旱环境中能形成较高产量和较好品质。砂石覆盖,也称砂田或石田,因其起源于甘肃兰州,也被称为兰州砂田或甘肃砂田。在水资源匮乏和蒸发量大的干旱和半干旱地区,砂石覆盖能有效接纳降水资源、蓄水保墒、减少土壤蒸发、改善土壤环境、防止水土流失、压碱和保持地力,有利于作物生长。我国南方也有砂田,另称水砂田。《王祯农书》关于耕垦记载了“山田不宜耕垦者,先以石杵碎之,次以砂石拌和,筑成坦途。雨则渗流,旱则润泽。”^[4],《广东新语》记载“粤西多石山,民凿石为田,覆以沙砾,引泉灌溉。虽土薄,然砂石间蓄水,旱涝皆收。”^[10]。西方砂田在波斯农书记载“在盐碱地上铺粗砂,可减少地下咸水上升。”^[12],古罗马农书亦

记述“在黏重的土壤中掺入石头和砾石,使水分快速渗透,促进作物生长。”^[13]。FAO报告中记述了非洲撒哈拉沙漠以南的萨赫勒地区用砾石覆盖可减少风蚀和水蚀,降低土壤温度 10°C ,减少水分流失30%,作物产量提高了50%~200%,作物水分利用效率提高35%和土壤有机质含量年均增加0.2%^[14]。建造砂田投入成本高,工程量大,但有较长的时效。先要深耕,施足底肥,耙平墩实,然后在土面上铺上粗砂和卵石或片石的混合体,其厚度,在旱砂田约8~12 cm,在水砂田约6~9 cm。每铺一次可有效利用三四十年,老化后要重新起砂、铺砂。砂田具有明显增产作用,十年以内的新砂田增产幅度可达30%~50%,杂草少,不用施肥。陶保廉在《辛卯侍行记》记载“嘉庆时有老农言,地下有石头,翻而布其上,就石隙种麦,丰茂倍他处。”^[15]。《魏书·张骏传》记载了骏议治石田,参军索孚谏曰“凡为治者,动不逆天机,作不破地德。昔后稷之播百谷,不垦磐石;禹决江河,不逆流势。今欲徙石为田,运土殖谷,计所损用,亩盈百石,所收不过三石而已,窃所未安。”^[16]。

2 农田覆盖技术当代发展:技术创新与挑战并存

随着耕作工具与覆盖材料技术的不断进步,当代农田覆盖技术不断创新,推动了农业生产力的极大发展。然而,农田覆盖也不可避免地带来新问题,如秸秆覆盖的病虫害防治难题、塑料地膜的土壤残留污染及其微塑料生态风险、塑料大棚引起的土壤过度利用与面源污染等。因此,农田覆盖技

^①图(a)来源: https://mbd.baidu.com/newspage/data/dtlandingsuper?nid=dt_4101345416708052115;图(b)来源: <https://fangzhi.b2b168.com/s168-142948189.html>

术也需要不断创新和应对挑战,才能更好地服务于农业生产的现代化发展。

2.1 秸秆覆盖

秸秆覆盖是干草覆盖在大田的升级版,但缺少了地上部光照调控。秸秆覆盖能够改变农田和林地水热环境,降低耕层土壤温度日变幅与季变幅,抑制土壤水分蒸发,提高保水能力,预防不良气候如干旱、霜冻和风蚀,利于作物增产,增加农民收入和保护生态环境,极大促进农业可持续发展。然而,与农业发展历史相比,秸秆覆盖出现较晚,应用时期并不长,应用范围也并不广泛。国内关于秸秆覆盖可以追溯到至少20世纪80年代。秸秆覆盖能够改良土壤理化性状、提高土壤肥力、减少地表径流、提升土壤肥力、增加土壤团粒结构、抑制杂草生长、增加土壤有机质(碳汇)、补充土壤养分、促进土壤微生物增殖与酶活性、降低碳排放、减少盐碱危害、促进农业生态系统养分循环、预防秋冬季焚烧空气污染及引发雾霾。秸秆覆盖还有留茬覆盖、锯末与糠壳覆盖等方式,它们只利用了部分秸秆。类似秸秆覆盖的不利方面包括使作物产生病虫害、土壤酸化风险以及生产成本增加,导致农产品损失与种植效益降低,大范围推广应用仍然面临较大困难。

2.2 生草覆盖

生草覆盖是在农田与果园保留自生草或人工草产生覆盖效应,也可以看作是干草覆盖的升级版。生草覆盖除了土壤水热调节外,还具有土壤有机质提升、水土流失控制、改善土壤理化性质(如降低土壤容重、增加孔隙度和提升养分有效性等)、调节果园小气候(如增加果园相对湿度和降低冠层空气温度等)、重塑果园生态环境(如冬防寒夏降温保护根系、疏松土壤如蚯蚓、提升土壤养分、为天敌提供栖息地与食物、降低害虫密度、提高果园生物多样性、创造良好的生物防治条件等)、节肥降本等功效。生草覆盖的不利方面包括与主栽作物竞争水肥、增加田间病虫害、影响土壤透气性和水肥投入增加等问题。

2.3 地膜覆盖

地膜覆盖技术始于20世纪50年代的日本,首次用于草莓,后推广到蔬菜和水果种植。塑料极大提升了农田覆盖效率,使得地膜覆盖很快推广到世界各地。美国于1963年在亚利桑那州开始种植地

膜棉花,中国于1978年引进,形成了具有中国特色的地膜覆盖栽培技术体系,使51种作物产量平均提高45.5%和水分利用效率平均提高58.0%^[17],土壤有效积温增加200~300℃,春季5~10 cm土层地温提高2~4℃,农作物生育进程加快10~20 d^[18]。地膜覆盖具有显著的土壤水热效应,包括增温、集雨、蓄水保墒和抑蒸抗旱效果,扩大作物适宜区,促进早熟增产和提高品质。地膜覆盖促进种子发芽与幼苗生长,保护幼苗过冬和抵御寒冷天气;减少地表径流与土壤养分流失,减少氮挥发,提高肥料的利用效率;增强土壤微生物活性促进土壤有机物的分解从而提高土壤肥力;地膜反光提高光合和促进生长,具有一定的光照调控功能;抑制杂草生长和减弱病虫害危害;抑盐保苗预防土壤盐渍化。地膜覆盖存在地膜残留及微塑料引发的生态危机,降解地膜虽有一定缓解,但并非长久之计,同时成本较大。因此,从长远看,替代地膜已经无法避免。另外,由于全球气候变暖的影响,地膜覆盖不得不面对夏季根系灼伤、作物减产甚至因高温窒息死亡等挑战。

2.4 温室(大棚)覆盖

温室与大棚属广义覆盖,在一定建筑空间内调控温度形成连续性植物生产,显著降低四季更替影响。温室透光材料是玻璃,大棚是塑料膜。温室(大棚)最大的技术进步在于地下(土壤)与地上(作物)同时覆盖,因而促进了作物生产力的巨大提升。关于温室与大棚较早雏形,在《汉书》中有“太官园种冬生葱韭菜茹,覆以屋瓦,昼夜燃藴火,待温气乃生,信臣以为此皆不时之物”^[19],《王桢农书》记载有“冬至移根藏以地屋荫中,培以马粪,暖而即长”“就归畦内,冬月以马粪覆之,于向阳处,随畦用蜀黍篱障之,遮冬风,至春,疏芽早出”“十月将稻草灰三寸,又以薄土覆之,灰不被风吹,立春后,芽生灰内,即可取食”等^[4],《梦溪笔谈》记载辽代燕蓟地区“用暖房(熏烟防寒)育菜”^[20],《学圃杂疏》记载“王瓜,出燕京者最佳;其地人种之火室中,通生花叶,二月初,即结小实,中官取以上供。”^[21],宋朝记载在帛上涂油使其不透气类似塑料膜,通过阳光照射来保持温度^[20],相传这项技术起源秦朝,当时就有冬季在骊山阮谷中种植瓜果并获收成的记述。阳畦育苗的起源可以追溯到金代(公元1115—1234年)^[4]。欧洲温室发展相对较早,技术进步较快。公元前6

世纪的罗马用透明琉璃建造封闭式建筑培育葡萄和香草,16世纪的荷兰将废弃海景玻璃窗用于冬季种植郁金香成为早期温室雏形,17世纪末的荷兰园艺家发明可控灌溉温室实现番茄全年栽培。此后,玻璃温室相继出现在法国、德国和英国,1903年建成第一栋玻璃温室,1967年首创连栋玻璃温室仍是当今的主流类型^[21]。我国从上世纪60年代出现了结构简单的塑料大棚,70年代后期新型环保日光温室大棚开始从农家院落逐渐发展到大田,温室与智能温室还处于发展初期^[22]。温室与大棚促进作物生长速度和品质,可以反季节种植,提高农业生产效率;解决了高寒地区、沙荒及干旱地区的蔬菜供应;结合相关农业技术实现水肥高效利用与精准管理,推动农业多元化发展,能够增加农民收入。未来在农业智能化推动下,温室与大棚是推动农业绿色转型的重要方向,为现代农业的发展注入新动力。温室适用于多种地区和多种气候,具有采光面积大、光照均匀、使用寿命长、栽培作物类型多、作物全年生长和生产效率高优势,是大棚升级版。玻璃温室主要不足是投资大、成本高、回收期长和风险大,要求较高的生产与市场管理水平。温室遇到夏季高温(室外温度 $>30^{\circ}\text{C}$)需要强制通风降温,在我国北方冬季种植需要加温,最长6个月,南方种植花卉或育苗也需要进行加温或临时补温。这些都限制了玻璃温室的应用。新疆在戈壁滩植树造林创造了一种微型温室,用塑料包住单株幼树如同

穿衣达到保水增温效果,降低了树干水分蒸发(当地称为保湿膜)和提早20~30 d生长;同时结合单株金属防兔网,软硬双覆盖使幼树成活率达到98%以上,如果配置与之相适应的地面覆盖,生产效率还有较大提升空间。

3 农田覆盖技术的未来展望:多学科融合与可持续发展

回望历史,农田覆盖几乎从未缺席农业生产;展望未来,农田覆盖对促进农业生产力持续提升必将发挥非常重要作用。从一定程度讲,现代农业离不开农田覆盖,如果没有多学科融合促进农田覆盖技术的创新发展,就不会有农业现代化,也不会有繁荣富强的人类社会。

3.1 农田覆盖是农业发展不可或缺的重要技术

农田覆盖通过改善耕层环境或营造作物适于生长空间,以提高农产品数量与质量,满足了人类社会需求,成为农业发展不可或缺的重要技术。农田覆盖的基本功效是改善土壤温度,促进生长或避免低温对生长的限制,实现了土壤水温调控的有效性和经济性的最大协调。农田覆盖能够保持土壤水分和养分,提高了水养利用效率,为作物高产创造了有利条件。作物生产力是主要受制于对生长要素的调控能力,农业高产高效均源于较高的调控水平(图5)。正因为如此农田覆盖才成为农业生产不可或缺的重要技术。土壤是大气、植被、

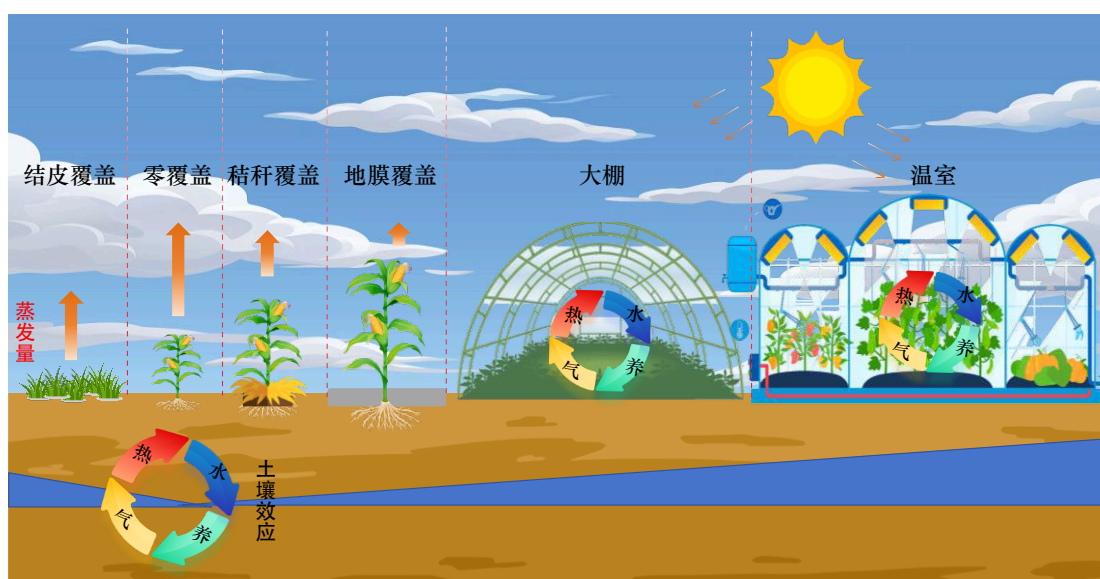


图5 不同覆盖模式下的农田土壤与作物效应比较

Fig. 5 Comparison of farmland soil and crop effects under different mulching patterns

浅层地圈、地下水和地表水连接纽带,是人类获取生活资料场所,也是植物健康生长与可持续生产的载体,因而也承受社会发展带来的巨大压力与威胁^[23]。诸如土壤退化(盐碱化、沙化、酸化、水土流失等)、温室气体排放和有害物累积等问题,可通过农田覆盖予以修复或缓解;还可调控土壤生物地球化学循环过程,强化岩石圈-生物圈-水圈-大气圈的物质循环与能量流动功能,提供必要的保护与保养措施。草原与盐碱地土壤具有表土层紧实趋势,形成生物结皮或非生物结皮本身就拥有覆盖功能;而农田因耕作措施如翻耕打断了表土紧实化进程,自我覆盖机制退化,只能通过人工措施予以解决低效覆盖问题。少免耕与留茬等一定程度上就是保护紧实化表层,但其本身存在覆盖功能不足,这也是农田覆盖技术不断创新进步的根本原因,也是突破地表覆盖向地上覆盖的(温室或大棚)跨越发展的促动力。毕竟,地表土壤与地上作物均有光温水气肥调控的需求,只是作物调控成本较高,加上技术瓶颈限制,还做不到大区域和大面积的应用。因此,当前农田覆盖的重点仍然是土壤覆盖,作物覆盖只能是量需和量力而行。

3.2 传统地膜覆盖的生态危机逐渐凸显

据统计,全球每年农业塑料薄膜使用量约有740万t,其中地膜使用量为200万t,呈现持续增长态势^[24-25]。中国西北地区是地膜残留污染最严重的区域,地膜残留量平均136.7~259.1 kg/hm²,局部地区高达502.2 kg/hm²^[26]。土壤微塑料破坏土壤结构,改变土壤理化性状和影响土壤养分循环,能通过根系吸收并在蔬菜的根茎叶累积,且与土壤微塑料浓度表现较大相关性^[27]。微塑料化学性质稳定,沿食物链中累积,最终威胁人体健康^[28]。进入人体后微塑料可在肺部和肠胃组织累积,其中小粒径微塑料可通过循环系统分布于各组织器官,产生潜在危机如诱发免疫反应、氧化应激和神经毒性、发育毒性和胚胎毒性^[29-30]等。目前已在人体排泄物、肺部、胎盘以及血液中相继检出微塑料^[31],其潜在的生态与健康风险已经无法回避(图6),地膜替代才是根本解决方案。近年来,通过推广可生物降解地膜、光降解地膜、高强度膜、提高膜际栽培回收率和减少残留,土壤修复,减少地膜使用量,推广无膜栽培,制定地膜相关规范,加强宣传教育提高环保意识,建立健全土壤微塑料监测与潜在风险评估

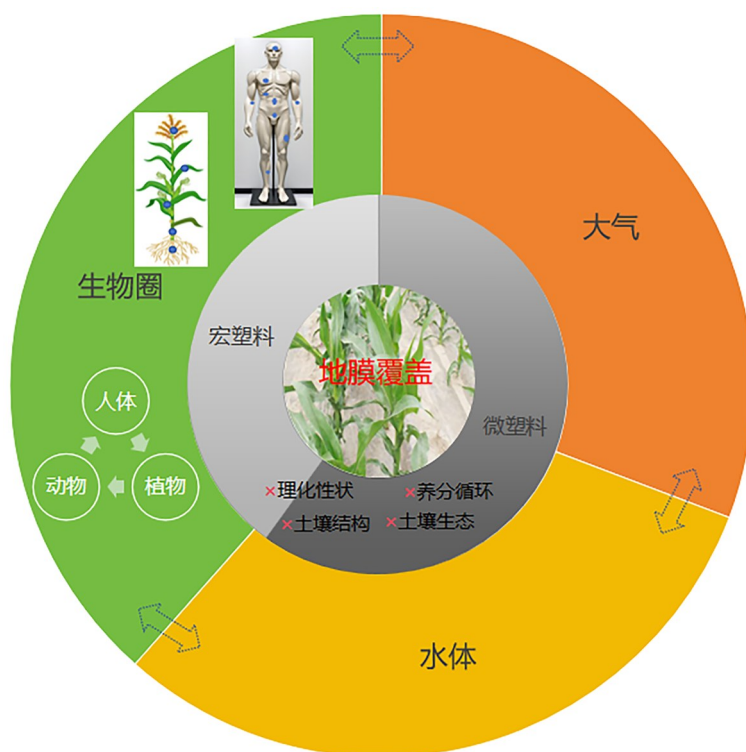


图6 地膜覆盖生态风险示意图

Fig. 6 Illustration of ecological risks caused by plastic film mulching

体系等手段,在农膜残留与微塑料污染防控方面取得一定成效,但有些仍面临成本高、推广难与效果不理想等问题。最新报道了一种可降解新型塑料,可快速解体为单体,这些单体能被微生物完全代谢,避免微塑料的生成,从而有效解决塑料污染问题^[32],但其可靠性与可推广性有待进一步关注。由此可见,基于地膜思维来解决生态风险举步维艰,谋划新赛道才是最好的选择。

3.3 土膜覆盖技术的兴起

3.3.1 土膜覆盖技术的优势

地膜覆盖无疑是一项伟大技术发明,极大提高了农业生产力,为社会发展做出了巨大贡献。然而,地膜覆盖引发土壤微塑料生态危机对人类健康产生威胁,替代传统地膜成为重要选择,但仍面临很多挑战。土膜覆盖在材料与方法上实现了较大创新,在农田表面喷施具有吸湿与黏结水溶液(如CMC-NH₄、CMC-Na和CMC-K等)诱导农田表层土壤颗粒黏结成土膜,改善耕层水热状况,促进生长和提高作物产量^[11]。土膜覆盖主要特点:一是耕层增温随喷施量增加而增加,具有智能控温特性,可根据预期增温目标制定施用量,也可依据生长季节选择适宜的施用量。二是实现了柔性覆盖,在降雨或灌溉情况下,土膜遇水溶解使水分原位下渗,不会增加田面汇流,有利于土壤接纳水分;在无降

雨或灌溉情况下,土膜保持固相结构限制土壤水分蒸发以保持土壤水分。三是土膜覆盖材料具有覆盖增温、土壤保水和供养(目前仅限氮和钾,理论上能够搭载部分营养元素)三重功效,使其兼具缓释化肥与保水剂功能,具备土壤复合调控潜质。四是土膜使表层紧实化,构造了“表实上虚下实”耕层结构,降低了土壤水热养挥发与淋溶损失,改造了“上虚下实”传统耕层结构,减少水热养挥发损失,促进了土壤水热养资源高效利用,有利于促生增产。土膜覆盖下春小麦与夏玉米的土壤积温提高7.9%~12.6%和5.6%~11.7%,生育时期提前6~10 d和3~7 d,土壤水分提高3.3%~7.0%和1.9%~6.1%,作物产量提高7.3%~18.8%和33.6%~49.0%;按施用量100 kg/hm²计,春小麦与夏玉米的土壤积温增加99.7℃和100.1℃,土壤水分增加4.2%和2.5%,作物产量提高10.4%和38.2%^[33]。土膜覆盖作为一种新型土壤耕作方法,也具有保护性耕作特征(图7)。土膜覆盖在物理表现很接近生物结皮或非生物结皮,具有一定仿生覆盖特征。土膜具有一定持久性,在作物生长季与全年能够持续表现覆盖效应;同时具有一定柔性,遇降水或灌溉土膜溶解,待土壤水分下降后恢复。土膜诱导材料的生产原料为植物纤维素,无污染或残留问题;单位面积上的作物秸秆完全可满足土膜覆盖需求。

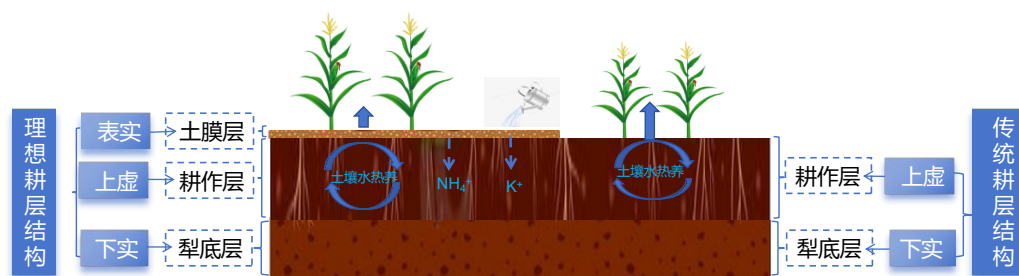


图7 土膜覆盖下的土壤增温保水固养及耕层结构改造

Fig. 7 Soil warming, water retention, nutrient conservation, and tillage layer structure improvement under soil film mulching

3.3.2 土膜覆盖是传统农田覆盖的继承与发展

土膜覆盖既有传统覆盖的特征,又有天然覆盖的影子。从农田覆盖的发展过程看(图8),细土覆盖是利用土壤小颗粒空隙小产生相对较强致密土壤结构而实现了地表覆盖,形成“以土覆盖”。践踏(脚踩)覆盖是通过压碎土块和压实表层土粒实现覆盖;石碾(碌碡)镇压覆盖可看作践踏(脚踩)在工具上的升级换代,采用更高效的滚动碾压,使覆盖

效果与劳动效率得到极大提升;耙耱镇压覆盖是通过摩擦碎土与人体重量压实表层土壤实现覆盖,尤其适用于山区坡地。践踏与耙耱体现了“以压覆地”,材料仍然是土。干草(草席)覆盖脱离“以土覆地”,完全采用“以物覆地”,覆盖材料具有覆土兼覆幼苗功能,也是覆盖在园艺上应用的雏形。秸秆覆盖可看作是干草(草席)覆盖的升级,适用于较大面积农田覆盖。生草覆盖本质上是“活体秸秆”覆盖,

实现了全生育期覆盖,适宜于果园。砂石覆盖利用细沙或砾石层压埋农田在干旱缺水环境下提高作物产量,具有典型的区域性适应性。地膜覆盖是基于工业新材料成就了农田覆盖突破性进展,是农田覆盖的伟大创新,未来几十年可能仍然是主要覆盖方式。温室(大棚)是农田与作物的全覆盖,是覆盖理念的颠覆性改变,体现了“以房覆地”,实现了覆盖技术的跨越式发展,是未来农业发展的主要方向。其实,自然界从不缺乏地表覆盖,如天然草地与荒漠地表的生物结皮与非生物结皮,在不受人为干扰或破坏的情况下,就能实现可持续覆盖。少免耕在一定程度上等同生物结皮与非生物结皮,是通

过减少耕层土壤干扰,提高表层土壤紧实度,从而形成农田覆盖,通常能够促进作物增产,但受制于土壤肥水补给困难与留茬导致病虫害等也可能导致作物减产,尤其是长期少免耕情况。由此可见,土膜覆盖传承“以土覆地”,采用物理、化学与生物学方法或手段,创造“以技(机)覆地”(技代表技术,机代表自然机制或机理),把植物纤维素改性为具有黏合特性的羧甲基纤维素醚,在农田表面喷施该材料水溶液能够促使土壤颗粒粘结成具有一定封闭性的表层,产生了增温保湿效应,因而具有了覆盖功能。土膜覆盖具有绿色覆盖属性,促进农田碳循环利用,有助于土壤健康发展。



图8 农田覆盖类型

Fig. 8 Field mulching types

3.4 农田覆盖的发展趋势

农田覆盖的本质是通过土壤保护保养,为作物生长创造良好的环境条件,获得更高产量,以满足人类社会需求。农田覆盖在未来农业中的地位会越来越重要,只有在实现覆盖功能、材料、技术与模式等方面的创新发展,才能推进农田覆盖技术体系的完善与进步。一是农田覆盖功能迭代发展。早期覆盖主要是增温或保墒,地膜实现了增温与保墒,土膜覆盖则具有了增温、保墒和供养功能,温室(大棚)实现了光、温、水、气和肥综合调控,未来还可能涉及土壤微生物、土壤动物、土壤气体和养分循环,甚至土壤污染与有害物防治等,形成多功能综合体。二是农田覆盖材料跃升发展。覆盖材料决定了覆盖功能与效率,由细土到秸秆,再到塑料、玻璃和土膜诱导粘合剂,表明覆盖材料的多样化及重要性。覆盖材料的想象空间很大,实

际上水和雪也可以作为覆盖材料,水田(水稻)具有较高的生物量,湿地具有较高的生物多样性,“瑞雪兆丰年”和“冬雪如被”等。随着材料技术创新,农田覆盖材料选择也会越来越多。三是农田覆盖技术的数字化发展。未来农田覆盖不仅能多功能化,还会赋予功能的数字标签,实现多指标的全程数字化调控,在不同季节、不同区域和不同生育期能够做到精准调控,完全打造针对具体作物的个性化数字化覆盖方案。四是农田覆盖的智能体发展。农田覆盖智能体是基于数字化调控方案,打造独立性体系,可完全脱离最初的母体农田,适应多种环境和自动化运行,可驻留能够到达的区域或空间,如同生物圈2号,是完全异化的创新覆盖。其实,农田覆盖的未来远超乎想象。五是创立农田覆盖学。未来的农田覆盖将与物理、化学、生物、电子、工程和人工智能等学科与技术不断交流

融合,促进技术进步与理论创新,形成具有相对独立性的农田覆盖学科,指导农业产业的现代化发展,也必将对人类社会作出巨大贡献。

4 结 语

农田覆盖技术本质上构建了一个动态的农田微环境调控系统,通过优化土壤-大气界面的能量与物质交换过程,显著提升水热资源利用效率并改善养分循环,提供优质和丰富的农产品供给,是农业可持续发展的重要支撑技术。现代农田覆盖技术已突破传统地表覆盖概念,发展成为融合土壤物理学、微气象学、生物化学和生态系统工程等多学科交叉的前沿领域,涵盖了从基础材料研发到农田实践应用,具有显著的系统性和工程化特征。面对全球气候变化加剧、人口持续增长与耕地资源刚性约束等多重挑战,农田覆盖技术正在经历革命性升级。未来发展方向呈现四大特征:一是功能多元化,满足不同生态区差异化需求;二是效率最优化,实现资源投入产出最大化;三是过程低碳化,降低全生命周期环境足迹;四是管理智能化,依托数字技术实现精准调控。农田覆盖转型需要技术创新、政策引导与市场机制协同,促进作物生产力可持续发展。农田覆盖技术正处于快速迭代的创新周期。随着智能传感、大数据分析和自主决策等技术的深度融合,智能覆盖将实现从被动防护到主动调控的飞跃,为农业可持续发展提供更强大的技术交叉融合与创新动能。

参考文献 References

- [1] 张双棣, 张万彬, 殷国光, 陈涛. 吕氏春秋译注[M]. 2版. 北京: 北京大学出版社, 2011
Zhang S D, Zhang W B, Yin G G, Chen T. *Notes on Lu's Spring and Autumn Translation*[M]. 2nd ed. Beijing: Peking University Press, 2011 (in Chinese)
- [2] 贾思勰. 齐民要术今释-第一分册[M]. 北京: 科学出版社, 1957
Jia S S. *Qimin Yaoshu Jinshi*(Volume 1)[M]. Beijing: Science Press, 1957 (in Chinese)
- [3] 巩玉生, 郝鹏鸿. 祁蒿藻农学思想研究-2-马首农言注释[M]. 高恩广, 胡辅华注释. 太原: 三晋出版社, 2011
Gong Y S, Hao P H. *Research on Qi Junzao's Agronomic Thought (Volume 2): Annotated Translation of Mashou Nongyan*[M]. Gao E G and Hu F H J translated and annotated. Taiyuan: Sanjin Press, 2011 (in Chinese)
- [4] (元)王祯著. 王祯农书[M], 王毓瑚校注. 北京: 农业出版社, 1981
(Yuan Dynasty)Wang Z. *Wang Zhen's Agricultural Treatise*[M]. Wang Y H edited and annotated. Beijing: Agriculture Press, 1981 (in Chinese)
- [5] (明)徐光启撰. 农政全书校注[M], 石声汉校注. 上海: 上海古籍出版社, 1979
(Ming Dynasty)Xu G Q. *Revised and Annotated Edition of Complete Treatise on Agricultural Administration*[M]. Shi S H edited and annotated. Shanghai: Shanghai Ancient Books Press, 1979 (in Chinese)
- [6] (元)鲁明善著. 农桑衣食撮要[M], 王毓瑚校注. 北京: 农业出版社, 1962
(Yuan Dynasty)Lu M S. *Nongsang Yishi Cuoyao*[M]. Wang Y H edited and annotated. Beijing: Agriculture Press, 1962 (in Chinese)
- [7] 曾令香. 试论《务本新书》的语料价值[J]. 长江大学学报: 社会科学版, 2011, 34(10): 174-176, 194
Zeng L X. On the linguistic value of wu Ben Xin Shu: A new book of farming [J]. *Journal of Yangtze University: Social Sciences Edition*, 2011, 34(10): 174-176, 194 (in Chinese)
- [8] 吴其濬. 植物名实图考[M]. 上海: 商务印书馆出版社, 1957
Wu Q J. *Zhiwu Mingshi Tukao*[M]. Shanghai: The Commercial Press, 1957 (in Chinese)
- [9] (宋)潜说友. 咸淳临安志[M]. 影印本. 杭州: 浙江古籍出版社, 2012
(Song Dynasty)Qian S Y. *Xianchun Lin'an Zhi(Facsimile edition)*[M]. Hangzhou: Zhejiang Ancient Books Press, 2012 (in Chinese)
- [10] (清)屈大均撰. 广东新语[M]. 北京: 中华书局, 1985
(Qing Dynasty)Qu D J. *Guangdong Xinyu*[M]. Beijing: Zhonghua Book Company, 1985 (in Chinese)
- [11] 杨世琦, 颜鑫, 韩钰. 土壤耕作法的土壤与作物效应研究[J]. 中国农业科学, 2024, 57(15): 3010-3022
Yang S Q, Yan X, Han Y. Effects of soil film tillage on soil and crop in farmland]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(15): 3010-3022 (in Chinese)
- [12] Ibn al-'Awwam Y M, Banqueri J A. *Kitab al-Filaha (Book of Agriculture)* [M]. Clément-Mullet J J translated. Madrid: Imprenta Real, 1802
- [13] Varro M T. *On Agriculture*[M]. William D H translated. Loeb Classical Library. Harvard UP, 1934
- [14] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). *Traditional Knowledge and Sustainable Agriculture*[M]. Rome: FAO Publications, 2001
- [15] 陶保廉. 辛卯侍行记[M]. 北京: 中国国际广播出版社, 2016
Tao B L. *Xin Mao Shi Xingji*[M]. Beijing: China International Radio Press, 2016 (in Chinese)
- [16] (北齐)魏收撰. 魏书[M]. 北京: 中华书局, 2000
(Northern Qi Dynasty)Wei S. *Weishu* [M]. Beijing: Zhonghua Book Company, 2000 (in Chinese)
- [17] Sun D B, Li H G, Wang E L, He W Q, Hao W P, Yan C R, Li Y Z, Mei X R, Zhang Y Q, Sun Z X, Jia Z K, Zhou H P, Fan T L, Zhang X C, Liu Q, Wang F J, Zhang C C, Shen J B, Wang Q S, Zhang F S. An overview of the use of plastic-film mulching in China to increase crop yield and water-use efficiency[J]. *National Science Review*, 2020, 7(10): 1523-1526
- [18] 陈奇恩. 中国塑料薄膜覆盖农业[J]. 中国工程科学, 2002, 4(4): 12-15, 21
Chen Q E. Mulching agriculture using thin plastic film in China [J]. *Engineering Science*, 2002, 4(4): 12-15, 21 (in Chinese)
- [19] (汉)班固撰. 汉书[M]. 北京: 中华书局, 2007
(Han Dynasty)Ban G. *Hanshu*[M]. Beijing: Zhonghua Book Company, 2007 (in Chinese)
- [20] (宋)沈括. 梦溪笔谈[M], 施适校点. 上海: 上海古籍出版社, 2015
(Song Dynasty)Shen K. *Mengxi Bitan*[M]. Shi S collated and punctuated. Shanghai: Shanghai Ancient Books Press, 2015 (in Chinese)
- [21] 王世懋. 学圃杂疏[M]. 上海: 上海古籍出版社, 2018
Wang S M. *Xuepu Zashu*[M]. Shanghai: Shanghai Ancient Books Press, 2018 (in Chinese)
- [22] 李式军. 设施园艺学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002

- Li S J. *Protected horticultural science*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2002 (in Chinese)
- [23] Banwart S A, Nikolaidis N P, Zhu Y G, Peacock C L, Sparks D L. Soil functions: Connecting earth's critical zone[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2019, 47: 333-359
- [24] Ding F, Jones D L, Chadwick D R, Kim P J, Jiang R, Flury M. Environmental impacts of agricultural plastic film mulch: Fate, consequences, and solutions[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 836: 155668
- [25] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). *Assessment of Agricultural Plastics and Their Sustainability: A Call for Action*[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2021
- [26] Zhang D, Liu H B, Hu W L, Qin X H, Ma X W, Yan C R, Wang H Y. The status and distribution characteristics of residual mulching film in Xinjiang, China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(11): 2639-2646
- [27] Liu X Y, Shao J L, Peng C X, Gong J S. Novel insights related to soil microplastic abundance and vegetable microplastic contamination[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2025, 484: 136727
- [28] Wang W F, Ge J, Yu X Y, Li H. Environmental fate and impacts of microplastics in soil ecosystems: Progress and perspective[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 708: 134841
- [29] Espinosa C, García Beltrán J M, Esteban M A, Cuesta A. *In vitro* effects of virgin microplastics on fish head-kidney leucocyte activities [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 235: 30-38
- [30] Hou J Y, Lei Z M, Cui L L, Hou Y, Yang L, An R, Wang Q M, Li S D, Zhang H Q, Zhang L S. Polystyrene microplastics lead to pyroptosis and apoptosis of ovarian granulosa cells via NLRP3/Caspase-1 signaling pathway in rats[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 212: 112012
- [31] Leslie H A, van Velzen M J M, Brandsma S H, Vethaak A D, Garcia-Vallejo J J, Lamoree M H. Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood[J]. *Environment International*, 2022, 163: 107199
- [32] Cheng Y R, Hirano E, Wang H, Kuwayama M, Meijer E W, Huang H B, Aida T. Mechanically strong yet metabolizable supramolecular plastics by desalting upon phase separation[J]. *Science*, 2024, 386(6724): 875-881
- [33] 颜鑫. 喷施羧甲基纤维素铵对土壤特性和作物根系及产量的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2023
- Yan X. Effects of spraying ammonium carboxymethyl cellulose on soil properties, crop roots, and yield [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2023 (in Chinese)

责任编辑:董金波



第一作者简介: 杨世琦, 博士, 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所研究员, 中国农学会耕作制度分会和中国生态学会农业生态专业委员会理事。主要研究领域: 农业生态环境、农业面源污染控制、农业清洁生产技术与区域农作制度优化等。先后获得陕西省科技进步二等奖、国家生态环境部科技进步二等奖、中国农业科学院科学技术成果二等奖等。主持和参与多项国家重点研发与国家重大水利专项等课题, 在 *Journal of Cleaner Production*、*Journal of Soil and Water Conservation*、*Journal of Applied Polymer Science*、*Scientific Report* 等国内外期刊发表文章 90 多篇, 主编、副主编与参编出版 19 部著作, 获得国家专利 7 项, 编写地方标准 5 项。