

## 覆盖作物的效益及其合理选择的研究进展

张建恒<sup>1,2,3,4</sup>, 张益兴<sup>1</sup>, 侯赛赛<sup>5</sup>, 李洪波<sup>6</sup>, 张瑞芳<sup>1,2,3</sup>, 王 红<sup>1,2,3</sup>, 王鑫鑫<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 河北农业大学国家北方山区农业工程技术研究中心, 保定 071001; 2. 河北农业大学河北省山区农业技术创新中心, 保定 071001; 3. 河北农业大学河北省山区研究所, 保定 071001; 4. 农业农村部华北节水农业重点实验室, 保定 071001; 5. 河北农业大学资源与环境科学学院, 保定 071001; 6. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

**摘 要:** 覆盖作物的种植是一种可实现农业可持续发展的保护性耕作措施, 对维护农业生产的可持续性具有积极意义。目前, 对覆盖作物的研究主要侧重于覆盖作物对土壤和后茬作物的影响评价, 包括对土壤有机碳、氮的固存, 对杂草和病虫害的抑制、对土壤理化性质的改良和对土壤微生物活性的影响等方面。然而, 覆盖作物的效益因覆盖作物类型、地理位置和覆盖时间不同而存在差异。另外, 覆盖作物的选择、设置方法、终止方法、经济效益等充满了不确定性, 这限制了其在农田中的大面积推广。该研究基于当前国内外的研究进展简要介绍了覆盖作物的种植管理现状, 总结了覆盖作物提供的多种生态系统服务功能, 讨论了限制覆盖作物在农作物种植系统中广泛应用的关键因素, 提出了覆盖作物合理选择的建议。同时, 基于覆盖作物在农学、生态环境上的经济和生态效益, 对覆盖作物的贡献以及面临的瓶颈进行了思考。发现良种培育、覆盖作物-土壤微生物-土壤养分-作物之间的协同机制仍是今后需要突破的重点课题, 以期覆盖作物的合理选择及大面积推广提供依据。

**关键词:** 作物; 栽培; 覆盖; 可持续发展; 经济效益; 生态系统服务; 遗传育种

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202303144

中图分类号: S19

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)-14-0023-12

张建恒, 张益兴, 侯赛赛, 等. 覆盖作物的效益及其合理选择的研究进展[J]. 农业工程学报, 2023, 39(14): 23-34.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202303144 <http://www.tcsae.org>

ZHANG Jianheng, ZHANG Yixing, HOU Saisai, et al. Research progress on benefits and rational selection of cover crops[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(14): 23-34. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202303144 <http://www.tcsae.org>

### 0 引 言

中国是世界上第一粮食生产与消费国, 用约占世界 9% 的耕地养活了近 20% 的世界人口。然而耕地面积的有限性与需求的无限性矛盾造成了化肥和农药的过度使用, 土壤重利用轻养护, 导致土壤养分失衡、土壤质量下降等土壤健康问题。因此, 中国亟需发展一种可实现农业生产力与生态环境保护的可持续种植制度<sup>[1]</sup>。

覆盖作物是指除目标作物以外, 利用人为种植的牧草或其他植物(包括牧草、截留作物、夏季绿肥和冬季覆盖作物)覆盖地面, 以达到保护土壤免遭风蚀和水蚀的目的<sup>[2]</sup>。魏静等<sup>[3]</sup>通过盆栽试验研究发现, 覆盖作物翻压后作为有机肥料添加进土壤中, 能够有效增加土壤养分含量, 改善土壤质量, 进而提高后茬经济作物的产量。严磊等<sup>[4]</sup>分析了覆盖作物根系对压实土壤的响应,

研究表明, 种植绿肥可改善压实土壤的物理特征及表层土壤的收缩特性, 有效减少土壤中硝态氮的淋失。此外, 覆盖作物在抑制杂草、防治病虫害<sup>[5]</sup>、改善土壤微生态、平衡温室气体排放等方面也有积极作用。以上研究表明, 农田冬季休闲期种植绿肥作物覆盖土壤, 可以从整体上改善农业土壤环境, 是可持续农业发展的重要组成部分。

然而, 由于地域间土壤条件和管理措施差异, 导致覆盖作物的应用效益不同。因此, 如何合理选择覆盖作物以提高覆盖作物的应用效益十分重要。基于 CNKI 数据库以“覆盖作物”为关键词对目前的研究现状进行可视化分析, 发现目前的发文量呈上升趋势, 于 2020 年达到峰值。但是, 对不同覆盖作物下土壤微生物表现出不同的代谢趋势以及这些趋势表现出覆盖作物生理活动的季节性变化研究、覆盖作物大面积纳入农业轮作系统的经济补偿研究、覆盖作物种质资源及合理选择研究甚少。该研究阐述了覆盖作物在农学及生态环境上的效益, 并结合中国各地区的自然资源条件、覆盖作物资源, 提出了覆盖作物合理选择的原则及符合该地区的种植模式。

### 1 覆盖作物概况

20 世纪 50 年代, 覆盖作物在中国发展迅速, 尤其在南方地区, 1950 年全国覆盖作物的种植面积达 173.33 万  $\text{hm}^2$ , 到 1976 年覆盖作物的种植面积扩展到

收稿日期: 2023-03-21 修订日期: 2023-06-21

基金项目: 国家重点研发计划青年科学家项目(2022YFD1901000); 河北省重点研发计划项目(21327005D); 河北省现代农业产业技术体系(HBCT2023110204); 国家重点研发计划项目(2021YFD1901001); 河北省科技厅项目(阜平县退化山场生态修复产业科技示范基地)

作者简介: 张建恒, 副研究员, 研究方向为冀西北特色作物节水高效生产技术。E-mail: [nxyzjh@hebau.edu.cn](mailto:nxyzjh@hebau.edu.cn)

\*通信作者: 王鑫鑫, 副研究员, 研究方向为冀西北特色作物节水高效生产技术。E-mail: [sywx@hebau.edu.cn](mailto:sywx@hebau.edu.cn)

1 300 万 hm<sup>2</sup><sup>[6]</sup>。但化肥农药便利性和高经济效益使覆盖作物的应用受到了冲击,至 2006 年覆盖作物的种植面积已不足 200 万 hm<sup>2</sup><sup>[7]</sup>。近年来,在国家政策的支持下,覆盖作物的种植面积开始缓增,2016 种植面积达 320 万 hm<sup>2</sup><sup>[7]</sup>。然而,覆盖作物的大面积推广还需建立一套完整的合理田间管理方法和效益评价体系。

覆盖作物从大类上可分豆科、禾本科、十字花科以及菊科。豆科覆盖作物具有生物固氮的作用,不仅能与固氮细菌共生获取大气中的氮气,还能与根瘤菌共生固

氮,增加作物氮素的吸收,同时削弱其与主栽作物对氮素的竞争关系。禾本科覆盖作物生物量高、播种时间较灵活,能有效减少杂草的密度和生物量,增加土壤水分的可用性。十字花科覆盖作物生长迅速、主根较大、扎根较深,能有效缓解土壤压实和增加土壤水分入渗,在免耕系统中应用广泛。菊科覆盖作物种类多,能够增加景观的丰富度,并且其具有较好的抗寒性、抗旱性和抗盐碱性,在防止深层土壤返盐及改善盐碱地绿化方面效果显著。常见的覆盖作物品种和特点见表 1。

表 1 常见的覆盖作物物种和特点  
Table 1 Common cover crops species and characteristics

种类 Specis	代表作物 Crop representative	习性 Characteristics	作用 Effect	建议种植模式 Proposed planting pattern
豆科 Lefuminosae	毛叶苕子 <i>Vicia villosa</i>	生物固氮、根系发达、生长迅速、结实量大、繁殖方便。	与根瘤共氮、减少氮素投入 <sup>[8-9]</sup> ;在不降低主作物产量的情况下抑制田间杂草 <sup>[10]</sup>	可与玉米或者高粱间作,与小麦或其他覆盖植物混播生长良好,一般与春季谷物混播
	绛车轴草 <i>Crimson clover</i>			
	野豌豆 <i>Vicia sepium</i>			
	草木犀 <i>Melilotus officinalis</i>			
	苜蓿 <i>Medicago sativa</i>			
禾本科 Grass family	黑麦 <i>Secale cereale</i>	分蘖性强、碳氮比高、生物产量高、播种时间灵活 <sup>[11]</sup>	与杂草竞争生态位、也可释放化感物质抑制杂草生长;增强土壤水分的可用性、减缓土壤退化 <sup>[12-13]</sup>	条播、撒播;常与豆科植物混播,耐寒,秋播最晚
	黑麦草 <i>Lolium perenne</i>			
十字花科 Cruciferae	一年生黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i>	生长速度快、主根大、扎根深、抗冻性强 <sup>[11]</sup>	缓解土壤压实、增加水分入渗 <sup>[14]</sup>	条播、撒播;小粒谷物或者豆科植物混播
	油菜 <i>Brassica napus</i>			
	萝卜 <i>Raphanus sativus</i>			
菊科 Compositae	芥菜 <i>Rassica juncea</i>	种类多、花形各异、花期不同,喜温暖、耐高温,具有较好的抗寒性、抗旱性和抗盐碱性	防止深层土壤返盐,改善盐碱地绿化效果,增加景观丰富度	主要是水旱轮作和旱地套作;前期生长缓慢,多以间作为主,水旱轮作有利于减轻病虫害
	菊花 <i>Chrysanthemum × morifolium</i> Ramat			
	向日葵 <i>Helianthus annuus</i> L.			
	孔雀草 <i>Tagetes erecta</i> L.			
	蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i> Hand.-Mazz.			

覆盖作物可与主栽作物轮作,主栽作物秋收后,在土地冬闲期间种植覆盖作物,以增加地表覆盖度,减少土壤在休耕期的地表裸露时间,有利于减少水土流失和土壤侵蚀。但在轮作过程中,需要注意其与主栽作物的竞争关系,在自然资源受限的情况下,覆盖作物的种植会导致后茬作物减产<sup>[15]</sup>。覆盖作物还能在主栽物行间套种,行间套种可延长覆盖作物的生长时间,使其达到最大的秋季生物量。条带状种植覆盖作物是一种创新型的种植模式,其每隔 3 或 4 畦主栽作物种植一畦覆盖作物,能实现土壤理化性质改良,来年再将条带轮换,并定期刈割将剪下部分当作相邻条带主栽作物的覆盖层。由于单一覆盖作物模式可能会因为其根系的密度过高而影响后茬作物的播种和萌发<sup>[16]</sup>,因此为增加农田生态系统物种多样性,覆盖作物的种植除了单播以外还可以采用不同覆盖作物混播,简单的增加混播覆盖作物数量并不意味着能达到更好的效果,混播效果依赖于各物种之间的功能互补。总之,在进行覆盖作物物种组合和种植模式的选择时,应该充分考虑覆盖作物与主栽作物在时间和空间上的优化配置,同时兼顾二者的生境,达到覆盖作物最大的综合效益。

2 覆盖作物覆盖对后茬作物的影响

2.1 覆盖作物对后茬作物产量和品质的影响

合理的覆盖作物可以支持更有弹性的农业生态系统,但其对后茬作物产量的影响各不相同。有研究表明,覆

盖作物翻压还田对后茬作物产量具有显著的提升作用<sup>[3]</sup>,也有研究表明,在休耕期种植覆盖作物对后茬作物产量的提升是不显著的<sup>[17]</sup>,甚至在高温干旱条件胁迫下可能会降低后茬作物的产量<sup>[18]</sup>。棉花 (*Gossypium hirsutum* L.) 不仅仅是重要的经济作物,更是重要的工业原料作物和技术作物,其高效生产对于国民经济具有重要意义;覆盖作物对其产量和净收益的影响至关重要,相关研究表明,与免耕相比,种植覆盖作物可能会增加总成本,但是覆盖作物的种植可提高皮棉产量和净收益<sup>[19]</sup>。绿肥结合有机肥部分替代化肥(氮肥减量 20%~40%)能够保持甚至提高稻谷周年产量、氮肥偏生产力及氮肥农学利用率<sup>[20]</sup>。覆盖作物在果园中也有应用,但是由于覆盖作物与主栽作物之间存在钙、铁、锰和锌等的营养竞争,因此,与裸土管理相比,覆盖作物的种植会影响杏园树木的生长和降低产量<sup>[21]</sup>。覆盖作物种植增产的稳定性取决于多方面的因素,包括覆盖作物品种的选择、连续种植的时间以及是否施肥等<sup>[17]</sup>。生产者通常以后茬作物的性状和经济效益来衡量覆盖作物应用的可行性,而忽略覆盖作物在生态系统服务功能上的潜力。有研究表明,覆盖作物的建植能提高棉花的纤维素质量<sup>[22]</sup>。同时,林间自然生草覆盖也是一种保护性耕作,其在改善果园土壤性质,提高果实品质,改善环境质量方面有积极作用<sup>[23]</sup>。因此,在进行覆盖作物效益评价时,应该综合考虑社会效益、经济效益和生态效益。

2.2 覆盖作物对杂草和病虫害的控制

在农业生产系统中,田间杂草、病虫害对作物的影



响一直是农业领域的热点话题<sup>[11]</sup>。依赖化肥、农药来提高粮食产量已经引发了一系列的农业面源污染问题,除草剂的大量使用也容易导致杂草形成抗药性,不利于农业生产的可持续性。随着研究的深入,人们开始认识到覆盖作物在抑制田间杂草生长、减少病虫害等方面起着重要作用。覆盖作物一方面通过占据杂草生态位,与杂草直接竞争光照、营养和水分等资源,从而抑制杂草生长<sup>[24]</sup>。另一方面通过影响农田及其周围的生境,为害虫天敌提供一个稳定的生长环境,增加害虫天敌的数量<sup>[10]</sup>,能够达到自然控制害虫的目的。有研究结果表明,豆类、谷物覆盖作物混合应用可能会增强寄生蜂的活动,并成为农业害虫天敌的蓄水池<sup>[25]</sup>。种植者通过种植覆盖作物自然减少虫害而减少杀虫剂的投入,总体上不会产生额外的生产成本。抗病绿肥轮作和秋季覆盖作物的疾病抑制系统能有效减少马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)种植区的土传块茎病害、黑痣病等<sup>[26]</sup>。此外,覆盖作物中植物的化感作用(植物或者微生物通过释放化学物质到环境中而产生的对同种植物、其他植物、微生物直接或间接的有益或有害的作用),既能抑制杂草生长又有利于病虫害的防治<sup>[24]</sup>。

### 3 覆盖作物对土壤理化性质的影响

#### 3.1 覆盖作物对土壤养分的影响

在中国的华北地区,冬闲土地面积较大,长期闲置不仅会造成光热和水土资源的浪费,还导致土壤质量退化,同时养分随土壤侵蚀而大量流失,造成了一系列的环境问题。20 世纪以来,化肥作为主要的养分输入,保证了我中粮食增产和世界粮食安全<sup>[27]</sup>。但是,较低的化肥利用率使大量养分在土壤中残留或以各种形式损失,对土壤健康和生态环境产生一定的影响。覆盖作物翻压还田是土壤养分输入的重要组成部分,绿肥翻压可使当季土壤有机质含量提高,有效改善土壤养分状况<sup>[28]</sup>。覆盖作物的效益还表现在提高土壤的抗蚀性、抗冲性等方面,能够有效减少土壤侵蚀和养分淋滤,达到固持养分的作用。SILVEIRA 等<sup>[29]</sup>认为,覆盖作物的残体是农田土壤有机碳的主要来源,含碳量大于 40%。同时,冻害灭生(冬季,温度突然降到植物生育所能忍受的下限,造成农作物生理障碍或器官受损,最终导致不能正常生长)覆盖作物可增加土壤的全氮和有机质<sup>[30-31]</sup>。有研究表明,主栽作物秸秆和覆盖作物的协同作用对土壤肥力提升具有积极意义,前者有利于土壤有机碳的积累,后者有助于产量的提升<sup>[32]</sup>;覆盖作物与主栽作物秸秆物料混合还田可改善养分的释放特征,延长释放周期,更有利于后茬作物的吸收利用<sup>[33]</sup>;但是,在还田时应该综合考虑混合物料对各土层土壤养分的提升效果<sup>[34]</sup>,以及对主栽作物发病率和发病指数的影响<sup>[35]</sup>。因此,研究秸秆还田和覆盖作物建植的协同关系具有重要意义,它既能缓解秸秆焚烧对环境的影响,又能降低秸秆单独还田的土传病害。覆盖作物还田不仅影响土壤养分的含量,还能在一定程度上影响养分的释放速率。总之,绿肥轮作能够提高土壤有机碳质量分数和土壤碳库指数,有利于

改善土壤质量,提高土壤肥力<sup>[36]</sup>。

#### 3.2 覆盖作物对耕层土壤含水量的影响

中国地域辽阔,水资源丰富,但淡水资源不足且空间分布不均衡已成为制约中国干旱半干旱区粮食生产的重要因素<sup>[37]</sup>,如何高效的利用土壤水是农业发展的关键问题。覆盖作物作为一种土壤调控技术,能有效提高水分的利用效率,调节土温,从而起到保水保墒的作用。土壤含水量是表征土壤水分状况的重要指标,影响着作物的生长和分布格局。而覆盖作物可以增强雨水入渗,通过改善土壤结构和提高土壤蓄水保水能力,有效抑制土壤水分蒸发来调控土壤含水量<sup>[38]</sup>。冬季覆盖作物是一种生物覆盖方式,主要功能是在土壤表面形成保护层,一方面覆盖作物能够缓解雨水直接冲刷地表、增加径流的形成时间、使更多的雨水渗入土壤;另一方面,覆盖作物的遮蔽作用也能减少地面水分蒸发<sup>[39]</sup>。相关研究表明,覆盖作物对于后茬作物的土壤含水量和土壤水分动态影响在更深的土层中更明显<sup>[40]</sup>,覆盖作物可缓解 300~500 cm 土层水分消耗,降低无效蒸散<sup>[41]</sup>。且覆盖作物对于土壤含水量的影响在潮湿地区显得相对明显。但是,在半干旱环境中,覆盖作物竞争土壤水分是一个潜在的不利因素,其对水分的消耗会大大降低后茬作物的产量<sup>[42]</sup>。MARCILLO 等<sup>[43]</sup>的研究表明,毛苕子(*Vicia villosa*)作为覆盖作物与休耕相比,降低土壤含水量 178 mm,随后种植小麦产量减少了 42%~83%。因此,在水资源不充裕的地区,可选择不耐寒的作物作为覆盖作物,并在冬天利用低温将其灭生还田,这样能在一定程度上减少越冬覆盖作物对水分的消耗,消弱覆盖作物对后茬作物的负面影响,同时也能减少因多次耕作灭生、机械灭生、药物灭生对土壤健康的影响。

#### 3.3 覆盖作物对土壤容重和总孔隙度的影响

田间土壤压实使得土壤颗粒重新排列得更加紧密,孔隙度减小,土壤紧实度增加,土体的稳定性减弱、通气性变差,容易导致养分的流失<sup>[44]</sup>。覆盖作物作为土壤保护性作物,其根系具有很强的穿插能力,能够改善土壤结构,缓解土壤压实,从而提高后茬作物的产量<sup>[45]</sup>。王明亮等<sup>[46]</sup>对茶园不同作物覆盖处理的土壤物理性质研究,发现 4 种不同作物覆盖均可显著降低 0~15 cm 土层土壤容重,增加总孔隙度,但对 15~30 cm 土层影响较小。赵秋等<sup>[47]</sup>以二月兰(*Orychophragmus violaceus*)、毛苕子、冬黑麦(*Winter rye*)、冬油菜和草木樨为覆盖作物进行试验,探索覆盖作物对土壤容重和孔隙度的影响,试验结果表明,各覆盖作物处理土壤容重分别为冬闲田的 95.38%、96.92%、94.62%、93.08%、96.15%,土壤总孔隙度分别为冬闲田的 105.50%、103.77%、105.79%、107.82%、104.35%。DUNG 等<sup>[48]</sup>的研究表明,豆科作物覆盖使 0~10 和 10~20 cm 土层土壤容重分别降低 0.07 和 0.08 g/cm<sup>3</sup>。CALONEGO 等<sup>[49]</sup>的研究结果表明,覆盖作物能够增加土壤大孔隙度,能够有效降低 40~60 cm 土壤容重。可见覆盖作物在一定程度上能够降低土壤容重和增加土壤孔隙度,在免耕系统中引入覆盖作物具有重要意义。

### 3.4 覆盖作物对土壤酸碱性的影响

土壤酸碱性变化会导致土壤一系列的化学反应,如降低土壤养分的有效性或产生有害物质,土壤的酸碱性还会影响土壤微生物的活性,进而影响土壤养分的转化,影响作物生长。种植覆盖作物通常具有平衡土壤酸碱性的作用。为了探究覆盖作物的栽培对土壤 pH 值的影响,曹锐<sup>[50]</sup>对覆盖作物栽培下土壤质量做了研究,发现在种植覆盖作物地块的 0~5 cm 土层中,无论保留主栽作物残留与否, pH 值均略高于无覆盖作物且保留主栽作物残留的地块,其 pH 值在 6.0~7.4 之间,但 5 cm 以下土层 pH 值无特殊变化。张玲玲等<sup>[51]</sup>对五年生猕猴桃 (*Actinidia chinensis* Planch.) 果园进行多年生覆盖作物试验,发现白三叶草和黑麦草混种可显著降低土壤 pH 值。也有研究表明,覆盖作物的种植对土壤 pH 值并没有显著影响<sup>[52-53]</sup>。土壤 pH 值受季节的变化通常大于是否种植覆盖作物对其的影响<sup>[54]</sup>。

## 4 覆盖作物的环境效益

### 4.1 覆盖作物对土壤酶活性的影响

土壤酶活性可以表征土壤生物活性的大小,参与土壤碳、氮循环,在土壤有机碳及其活性组分转化中发挥关键作用。土壤酶、微生物和养分之间存在紧密联系,土壤微生物群落对土壤养分进行转化和积累,土壤养分作为土壤酶的生物化学反应提供底物,土壤酶进一步影响土壤微生物群落结构,三者相互作用,共同维护土壤系统平衡。覆盖作物的种植在一定程度上可提高土壤的酶活性<sup>[32]</sup>。范玮玮等<sup>[55]</sup>经过两年的玉米与豆科覆盖作物间作发现,间作紫花苜蓿、大豆、花生 (*Arachis hypogaea* Linn.) 与单作玉米相比土壤脲酶活性有所提高,玉米间作花生、大豆较单作玉米酸性磷酸酶活性分别提高了 30.53% 和 18.70%,玉米间作紫花苜蓿对比单作玉米土壤碱性蛋白酶和蔗糖酶活性有显著提高。乔月静等<sup>[56]</sup>也对豆科作物与燕麦间作做了研究,发现覆盖作物的种植显著增加了土壤过氧化氢酶、蔗糖酶和脲酶的活性。巴晓博等<sup>[57]</sup>做了同样的间作试验,发现玉米与豆科覆盖作物间作还提高了氮转化相关酶的活性,增强了土壤氮素的转化潜能及可利用性。酶活性的提高,促进了农业生态系统的碳氮循环,对提高养分的利用率和维护农业生态环境有一定的积极作用。

### 4.2 覆盖作物对土壤微生物活性及功能多样性的影响

覆盖作物的种植对土壤微生物群落结构、数量、多样性<sup>[58]</sup>以及土壤微生物的生物量<sup>[59]</sup>产生影响。果园中种植覆盖作物是一种现代化果园土壤管理模式,在提高土壤微生物活性方面具有重要作用<sup>[60]</sup>。有研究表明,与清耕相比行间种植覆盖作物改变了葡萄 (*Vitis vinifera* L.) 小气候和葡萄微生物群落多样性和结构<sup>[61]</sup>。李青梅等<sup>[62]</sup>在研究覆盖作物不同利用方式对猕猴桃果园土壤微生物群落结构的影响时发现,种植覆盖作物后,无论后期刈割于土壤表面自然腐解还是刈割后从园中清除,与清耕相比,土壤微生物磷脂脂肪酸总量和微生物量碳、氮均显著高于清耕。此外,覆盖作物还可以显著提高作物根

际丛枝菌根真菌的数量和土壤有益微生物的生物量,并且可以扩大菌圈至更深的土壤层,有利于作物生长<sup>[63]</sup>。范玮玮等<sup>[55]</sup>在覆盖作物对土壤酶活性和真菌群落特征影响的研究中,发现间作紫花苜蓿和间作大豆对土壤优势菌门子囊菌门和被孢霉门的相对丰度有积极作用,其中间作紫花苜蓿处理子囊菌门的相对丰度提高了 11.88%,间作大豆处理被孢霉门相对丰度增幅达 45.39%。在农业生产系统中,微生物对系统的物质循环和能量流动意义重大;土壤微生物分解有机质,促进氮、磷、硫等养分的循环和转化,促进农作物生长;微生物活性和功能多样性的增加能够促进农业生产系统的能量流、物质流、信息流和价值流。

### 4.3 覆盖作物对土壤重金属的影响

土壤重金属污染严重制约国民经济的发展和土壤资源可持续利用,已经成为世界性的环境问题<sup>[64]</sup>。植物修复技术作为一种低成本、环境友好的修复技术,在治理重金属污染土壤方面具有广阔的应用前景<sup>[65]</sup>。覆盖作物对重金属具有一定的提取能力,为了研究十字花科覆盖作物对城市污水灌溉的重金属污染土壤的修复,IFTIKHAR 等<sup>[66]</sup>以 4 种十字花科植物 (芥菜型油菜、甘蓝型油菜、白菜型油菜、油菜) 进行盆栽试验,分析各种植物的形态生理、生化和植物提取因子,发现芥菜 (*Brassica juncea* (L.) Czern. et Coss.) 中积累了最大量的重金属。豆科覆盖作物与玉米间作也显著提高了玉米对铬 (Cd) 的吸收,豆类对玉米和花生中镉浓度的影响较大,是提高土壤中镉提取率的潜在间作模式<sup>[67]</sup>。同时,植物能通过根际的沉淀作用或土壤钝化剂对重金属进行络合固定,从而降低土壤重金属的生物有效性。覆盖作物残体具有改善镍矿区土壤质量的潜力,在降低重金属含量方面也表现出积极的优势<sup>[68]</sup>,尤其是对铁 (Fe)、锰 (Mn) 和锌 (Zn) 等金属。

### 4.4 覆盖作物对温室气体排放的影响

农田耕作是温室气体的主要来源之一。对此,中国提出了“双碳目标”,如何通过减排增汇实现“碳中和”已经成为气候变化研究的热点<sup>[69]</sup>。甲烷 (CH<sub>4</sub>), 二氧化碳 (CO<sub>2</sub>), 一氧化二氮 (N<sub>2</sub>O) 是主要的温室气体,其产生与农田耕作和管理措施息息相关。覆盖作物的种植会增加土壤微生物的丰度和活性,导致呼吸加强,产生 CH<sub>4</sub> 等呼吸产物;同时,覆盖作物灭生还田为土壤动物提供了大量的碳源和能源物质,硝化和反硝化作用加强,反硝化作用的产物 N<sub>2</sub>O 含量会有所增加。也有研究表明,覆盖作物的种植对 N<sub>2</sub>O 的排放并没有显著的影响<sup>[70]</sup>,在实现农业效率最大化的同时,不增加或减少 N<sub>2</sub>O 的排放<sup>[71]</sup>。土壤中 CO<sub>2</sub> 的排放通量与土壤水分和田间覆盖作物的生物量相关,在自然降水格局下,黄土高原区裸地休闲在降低全球变暖趋势的同时也增加了后续冬小麦产量<sup>[72]</sup>。但是,也有研究结果表明,覆盖作物的种植可在一定程度上减少 CO<sub>2</sub> 的排放,KAYE 等<sup>[73]</sup>的研究结果表明,1 m<sup>2</sup> 的覆盖作物每年可减少 100~150 g CO<sub>2</sub> 的排放,并且在 100 a 的时间内,该变化可能会减少至每年 12~46 g/m<sup>2</sup>。农业生态系统是一个复杂的系统,覆盖作



物在影响环境的同时，环境也影响覆盖作物的建植和后茬作物的生长<sup>[74-75]</sup>。目前，覆盖作物对净温室气体排放影响机制、特定地点温室气体外排测量研究较少，覆盖作物种植系统土壤温室气体排放对气候变化的影响不太明确。

4.5 覆盖作物对水环境的影响

覆盖作物和耕作方式会影响土壤中的碳库和氮库，这可能会影响农田中的溶解性有机碳和氮的淋溶。在有利的条件下，覆盖作物是清除主要作物后土壤中有效氮和减少硝酸盐浸出的有效工具。覆盖作物可通过增加氮的利用率和清除土壤中过量的  $\text{NH}_4\text{-N}$  来增强作物生产和减少氮流失对环境造成的压力<sup>[76]</sup>，同时，覆盖作物覆盖或覆盖作物灭生后秸秆覆盖会降低坡面流的流速，降低坡面流的破坏力，减弱土壤侵蚀对水环境的影响<sup>[77]</sup>。通常，在退化土壤中使用覆盖作物可以改善碳、氮库及土壤和水质。在农业生产系统中，大部分氮、磷的浸出多发生在秋冬季节，而春季由于降雨量较少，氮磷的浸出量可忽略不计。秋季氮素淋失与覆盖作物生物量、氮素吸收和根长密度呈负相关，有研究表明，与休耕相比，萝卜和含有萝卜的混合覆盖减少了 49%~73% 的氮浸出，且萝卜残渣和含有萝卜的混合物矿化后，春季土壤矿物质 N 比休耕增加了 70%~110%<sup>[78]</sup>。长期种植冬季覆盖作物黑麦可降低排水量 8.1%、减少  $\text{NO}_3\text{-N}$  氮流失量 16.6%<sup>[79]</sup>。基于 2020 年各农作物种植面积和化肥消费量，中国油菜季秸秆还田可减少大量 N 肥的投入，在减少投入成本的同时削弱氮损失对环境的影响<sup>[80]</sup>。但是，覆盖作物后氮素的浸出受到播种时间及播种后的生长条件影响<sup>[81]</sup>。淋溶损失、硝酸盐浸出机制因覆盖作物的有效性、物种、播种时间、土壤类型、农艺管理和气候变化而异，准确量化覆盖作物建植的环境效应至关重要。

5 覆盖作物的合理选择

覆盖作物被认为是在兼顾主栽作物产量前提下，实现农业可持续生产的新策略<sup>[58]</sup>。其主要目的不是为了收获，而是为了产生众多的生态服务功能，如减少土壤侵蚀、养分流失，改变土壤理化性质、提高土壤质量<sup>[82]</sup>，抑制杂草生长、控制病虫害<sup>[5]</sup>，提高土壤微生物的活性和微生物群落功能多样性<sup>[83]</sup>，提高后茬经济作物产量、维持生态环境平衡（图 1）。然而中国南北方气候等自然资源禀赋差异巨大，并不是所有的覆盖作物在不同地方都能产生良好的生态服务功能。如前所述，在一些自然条件的胁迫下，覆盖作物也可能会导致后茬经济作物减产、增加温室气体排放等不利结果。因此在选择覆盖作物时，需要结合当地的田间小气候和种植者的目的进行品种、种植时间、种植模式的选择。

覆盖作物的性能是多因素共同作用的结果，降水不是影响其增长的唯一因素，在进行大面积推广时，还需要研究覆盖作物性状随温度、蒸散量、短生长季和其他生长因素的变化。与此同时，覆盖作物的建植也需要一些田间管理措施（施肥、菌剂），进而增加覆盖作物的生物量<sup>[84]</sup>。中国各地区覆盖作物种植情况各不相同（表 2）。

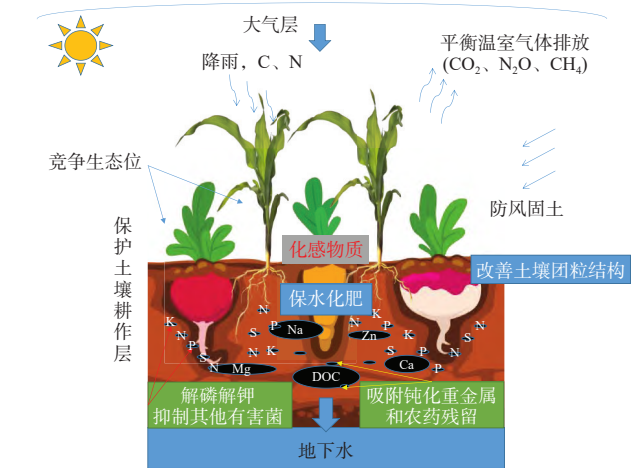


图 1 覆盖作物作用模式

Fig.1 Model diagram of cover crops

表 2 中国各地区覆盖作物的种植情况

Table 2 Planting situation of crops covered in various regions of China

地区 Area	省份 Province	主要覆盖作物 Main cover crop	代表模式 Representative model
南部 South	广西	紫云英、油菜	雁江“绿肥+”富硒香米生产模式
	福建	紫云英	间套作、轮作、肥饲兼用、茶园果园绿肥种植、观赏绿肥种植
	湖南	油菜、紫云英	“绿肥+”优质大米模式
西南 Southwest	云南	黑麦草、肥田萝卜、光叶紫花苕子	“绿肥+”助力烤烟产业绿色发展
	重庆	豌豆、毛叶苕子、紫云英、二月兰、油菜	梨、柑橘、稻米套作绿肥模式
	四川	二月兰	“绿肥+”助力柑橘产业高质量发展模式
西北 Northwest	青海	豌豆、毛叶苕子	“小麦+绿肥+牛羊”种养循环模式
	甘肃	豌豆、毛叶苕子	“绿肥+”甘味苹果生产模式
	新疆	白三叶、三叶草、毛叶苕子	“绿肥+”助力苹果园种养（鸭鹅）模式
中原 Centre	河南	紫云英	豫南“绿肥+”稻米生产模式
	河北	冬油菜	休耕农田冬绿肥轮作模式
	山西	二月兰	绿肥产业果园间作模式
东部 East	安徽	紫云英	“科技创新+文化引领”双轮驱动绿肥产业发展
	内蒙古	毛叶苕子、豌豆、油菜	“绿肥+”饲料化模式
北方 North	黑龙江	三叶草、紫花苜蓿、香青兰（ <i>Dracocephalum moldavica</i> L.）	间套轮作观赏、蜜源、香料、药材多功能模式

1) 覆盖作物在南方地区较容易推广，可以提高土壤有机质的输入量，成为固定土壤碳素、降低温室效应的有力措施，对于促进南方农业可持续发展具有重要意义<sup>[36]</sup>，且种类繁多，对南方地区具有重要的社会经济价值和环境效益。华北地区冬季寒冷，热量资源不足，但仍有一些作物在不影响主作物条件下能够存活并达到很高的生物量。

2) 在黄土丘陵区，天然降水是农业发展唯一的供给源，一种覆盖作物是否适用于该区果园间作高度依赖于其根系吸水剖面分布，这与土壤水分的可用性以及果树与覆盖作物间是否存在水分竞争密切相关，有研究显示，黄豆（*Glycine max* Merr.）比其他覆盖作物更多且更快吸收 0~30 cm 土层的水分，其生长有效改善土壤的水力特

性,从而让更多的水分有效地保存到更深的土层<sup>[85]</sup>。同时,黄土高原地区沟壑纵横,土壤流失严重,覆盖作物的生物结皮显著影响坡面产流过程,保持水土<sup>[86-87]</sup>;但是,覆盖作物对黄土高原浅层边坡的防护与覆盖作物的根长、建植时间有密切联系<sup>[88]</sup>。因此在进行覆盖作物选择时,应该合理选择,既要考虑根深浅搭配,又要考虑覆盖的时间效应。

3) 东北黑土地农田长期玉米连作,其产量的不断提高主要依赖化肥大量投入,有机物料投入严重不足,土壤“重用轻养”,导致耕层结构劣化、水肥保供能力急剧下降,土壤质量退化严重,土地产出效率和农业投入品的资源利用效率长期处于较低水平<sup>[89-90]</sup>。以土壤培肥为核心的有机物料因地制宜还田与轮耕休闲技术无疑是黑土地持续利用的有效途径<sup>[91]</sup>。覆盖作物的建植可能会降低产量,但是其对养分的保留不可忽视,可以侧重于在低残留矿物质氮的高产田中建植豆类覆盖作物,在低产田中建植草本覆盖作物<sup>[92]</sup>。况且,豆科覆盖作物的灰分含量显著低于非豆科覆盖作物,能够提供更多易分解的有机质。因此,在东北三江平原地区可根据主栽作物的类型和冠层结构,选择豆科的三叶草、紫花苜蓿作为覆盖作物,可以在调控土壤结构的同时促进养分的循环,有利于三江平原黑土地力的提升<sup>[93]</sup>。

4) 水热条件受限的地区,覆盖作物与杂草竞争的同时,也有可能与主栽作物竞争,况且,覆盖作物对不同的主栽作物存在竞争差异,有研究表明,三叶草(*Trifolium*)与大豆之间的竞争高于与玉米之间的竞争<sup>[94]</sup>。选择适宜的覆盖作物与主栽作物搭配以及合理的田间管理方法是消弱覆盖作物与主栽作物竞争的关键。

综上,覆盖作物的合理选择应该坚持因地制宜、豆禾结合和主要目的原则,合理考虑根深、浅搭配和时间效应。总之,耕地利用的绿色转型应充分考虑农业经济水平、耕地资源禀赋、政府扶持力度和技术的使用强度<sup>[95]</sup>。具体内容包括以下几个方面:

1) 耕地质量监测与评价:耕地质量评价是实现耕地科学管护的前提,从源头治理视角厘清耕地资源的本底,权衡休耕的迫切性,进行创新的保护性耕作<sup>[96]</sup>。在进行覆盖作物的种植之前应对该地区的自然资源进行科学准确的评价,实时准确地反映各地的自然资源状况,为覆盖作物的选择提供依据;

2) 种植者的主要目标:覆盖作物的种植有很多的益处,但是也有一定的局限性,因此在进行覆盖作物种植之前种植者应该明确主要的一两个目标,改良土壤、提高后茬作物产量,亦或是保持水土、防风固土等一系列生态系统服务功能;

3) 覆盖作物的习性:不同的覆盖作物的生长习性也有差别,因此在进行品种的选择时应该对其适宜性进行评价,避免单一的覆盖种植模式,做到因地制宜、因地制宜、合理组合,尽可能地降低覆盖作物与主栽作物之间的竞争,取得最大的综合效益。覆盖作物的合理选择是多方面的统一,如图2所示。

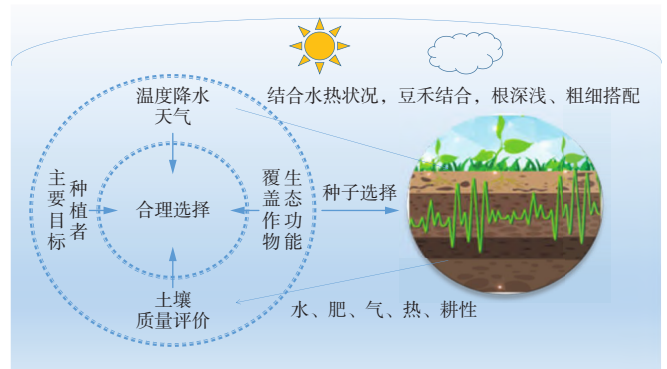


图2 覆盖作物的合理选择参考因素分析图

Fig.2 Reference factor analysis diagram for reasonable selection of cover crops

## 6 结论与展望

近年来,中国单一的连作模式、化肥农药的大量使用,导致土壤耕作层逐渐变薄、土壤酸化、土壤有机质含量下降,影响作物养分的吸收和利用。土壤质量的退化和土壤结构的破坏在影响后茬作物产量和品质的同时也导致了一系列的生态环境问题。覆盖作物的种植具有良好的农学和生态环境效益,对促进中国农业可持续发展具有重要意义。

1) 覆盖作物的种植能够改善土壤的物理、化学及生物性状,能够为经济作物提供良好的生境,促进作物生长,提升品质。

2) 覆盖作物得种植也能从多方面改善生态环境,例如,对杂草和病虫害的控制、对重金属的络合固持、对土壤养分淋溶的抑制及对盐碱地的改良等。

3) 中国地域辽阔,农作物的种植具有区域选择性,所以覆盖作物种类的选择尤为重要,选择不当可能造成后茬经济作物减产,因此,在覆盖作物选择时,需要根据当地的条件进行合理的选择、因地制宜,以达到最大的综合效益。

4) 覆盖作物的种质资源是限制覆盖作物大面积推广的因素之一,缺乏适宜的品种、种子质量差和市场供应的有限性等因素阻碍了覆盖作物在促进种植系统的多样化、提高种植系统的恢复力、最大限度地发挥覆盖作物的生态系统服务功能。

发展覆盖作物栽培技术,是解决中国生态环境问题的有效途径,无论是经济效益、生态效益,还是社会效益均具有显著优势。但是,中国各地区经济发展水平、土壤地力条件、绿肥政策、土地利用强度各异。因此,覆盖作物大面积推广的过程中还需要注意以下问题:

1) 覆盖作物的种植多是在一些试验田进行的模拟试验,其大面积推广种植需要更多的实践数据支撑,特别是在水资源有限或者半干旱地区进行覆盖作物的研究。

2) 土壤是一个复杂的系统,不同覆盖作物下土壤微生物的代谢机制、覆盖作物生理活动的季节性变化、覆盖作物-土壤-养分-作物间的协同机制需要进一步研究。同时,覆盖作物及经济作物养分效率基因改良、新型肥料研究是今后研究的重点课题,以增加养分效率潜力。



3) 更新农业价值观念, 加快覆盖作物生态效益货币化, 覆盖作物的效益一般需要经过多年才能体现出来, 然而因对覆盖作物的生态效益没有赋予任何价值, 是否增产成为覆盖作物是否大面积推广的唯一指标。同时, 政府应该大力投资, 推动“绿肥+”产业模式高质量发展。

4) 加强可耕地的适应性评价, 建植覆盖作物, 培肥土壤, 尽可能将可耕地转化为现状耕地。

5) 加强绿肥产业体系建设, 提高绿肥的“生态表现力”和“经济贡献力”。

#### [参 考 文 献]

- [1] CHAHAL I, VYN R J, MAYERS D, et al. Cumulative impact of cover crops on soil carbon sequestration and profitability in a temperate humid climate[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 13381.
- [2] 唐海明, 程凯凱, 肖小平, 等. 不同冬季覆盖作物对双季稻田土壤有机碳的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(2): 465-473.  
TANG Haiming, CHENG Kaikai, XIAO Xiaoping, et al. Effects of different winter cover crops on soil organic carbon in a double cropping rice paddy field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(2): 465-473. (in Chinese with English abstract)
- [3] 魏静, 郭树芳, 翟丽梅, 等. 覆盖作物翻压对华北平原春玉米产量和土壤养分的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2020(1): 172-178.  
WEI Jing, GUO Shufang, ZHAI Limei, et al. Effects of the incorporation of winter cover crop on succeeding spring maize yield and soil nutrient in the north China plain[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(1): 172-178. (in Chinese with English abstract)
- [4] 严磊, 张中彬, 丁英志, 等. 覆盖作物根系对砂姜黑土压实的响应[J]. *土壤学报*, 2021, 58(1): 140-150.  
YAN Lei, ZHANG Zhongbin, DING Yingzhi, et al. Response of cover crop roots to soil compaction in a vertisol (Shajiang Black Soil)[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(1): 140-150. (in Chinese with English abstract)
- [5] JENNIFER B. Functional traits in cover crop mixtures: Biological nitrogen fixation and multifunctionality[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2017, 55(1): 38-48.
- [6] 刘文奇. 广西绿肥生产现状与发展潜力及发展对策研究[D]. 南宁: 广西大学, 2017.  
LIU Wenqi. Present Situation, Development Potential and Development Countermeasures of Green Manure Production in Guangxi[D]. Nanning: Guangxi University, 2017.
- [7] 隋鑫, 霍海南, 鲍雪莲, 等. 覆盖作物的种植现状及其对下茬作物生长和土壤环境影响的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(8): 2666-2674.  
SUI Xin, HUO Hainan, BAO Xuelian, et al. Research advances on cover crop plantation and its effects on subsequent crop and soil environment[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(8): 2666-2674. (in Chinese with English abstract)
- [8] COOMBS C, LAUZON J D, DEEN B, et al. Legume cover crop management on nitrogen dynamics and yield in grain corn systems[J]. *Field Crops Research*, 2017, 201: 75-85.
- [9] VINCENT-CABOUD L, CASAGRANDE M, DAVID C, et al. Using mulch from cover crops to facilitate organic no-till soybean and maize production: A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2019, 39(5): 1-15.
- [10] VERRET V, GARDARIN A, PELZER E, et al. Can legume companion plants control weeds without decreasing crop yield? A meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2017, 204: 103-114.
- [11] 蹇述莲, 李书鑫, 刘胜群, 等. 覆盖作物及其作用的研究进展[J]. *作物学报*, 2022, 48(1): 1-14.  
JIAN Shulian, LI ShuXin, LIU Shengqun, et al. Research advances of cover crops and their important roles[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(1): 1-14. (in Chinese with English abstract)
- [12] BASCHE A D, KASPAR T C, ARCHONTOULIS S V, et al. Soil water improvements with the long-term use of a winter rye cover crop[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 172: 40-50.
- [13] GARCIA-GONZÁLEZ I, HONTORIA C, GABRIEL J L, et al. Cover crops to mitigate soil degradation and enhance soil functionality in irrigated land[J]. *Geoderma*, 2018, 322: 81-88.
- [14] ALCANTARA C, SANCHEZ S, PUJADAS A, et al. Brassica species as winter cover crops in sustainable agricultural systems in southern Spain[J]. *Journal of Sustainable Agriculture*, 2009, 33(6): 619-635.
- [15] DAVID C N, DREW J L, ROBERT K H, et al. Cover crop effect on subsequent wheat yield in the central great plains[J]. *Crop Economics, Production & Management*, 2016, 108(1): 243-256.
- [16] EUTENEUER P, WAGENTRIST L H, NEUGSCHWANDTNER R W, et al. Cover crops affect soybean yield components, but not grain quality[J]. *Agronomy Journal*, 2022, 114(6): 3193-3205.
- [17] BELFRY K D, EERD L L V. Establishment and impact of cover crops interseeded into corn[J]. *Crop Science*, 2016, 56(3): 1245-1256.
- [18] NELSON N O, ROOZEBOOM K L, YEAGER E A, et al. Agronomic and economic implications of cover crop and phosphorus fertilizer management practices for water quality improvement[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2022, 52(1): 113-125.
- [19] DeLaune P B, Mubvumba P, Fan Y, et al. Cover crop impact on irrigated cotton yield and net return in the southern Great Plains[J]. *Agronomy Journal*, 2020, 112(2): 1049-1056.
- [20] 张璐, 黄晶, 高菊生, 等. 长期绿肥与氮肥减量配施对水稻产量和土壤养分含量的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(5): 106-112.  
ZHANG Lu, HUANG Jing, GAO Jusheng, et al. Effects of long-term green manure and reducing nitrogen applications on rice yield and soil nutrient content[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(5): 106-112. (in Chinese with English abstract)
- [21] RUBIOASENSIO J S, ABBATANTUONO F, RAMÍREZ-CUESTA J M, et al. Effects of cover crops and drip fertigation regime in a young almond agroecosystem[J]. *Agronomy*, 2022, 12(11): 2606.

- [22] AGUIAR S G R, HONORATO R C, RAFAEL E F. Impact of cover crops and nitrogen on cotton fiber cellulose and quality traits[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2023, 54(8): 1079-1092.
- [23] 白岗栓, 周楠, 邵发琦, 等. 自然生草对渭北旱塬苹果园土壤氮及果实品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(10): 100-109.  
BAI Gangshuan, ZHOU Nan, SHAO Faqi, et al. Effects of self-sown grass on soil nitrogen and apple fruit quality in the Weibei dry plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(10): 100-109. (in Chinese with English abstract)
- [24] BOWERS C, TOEWS M, LIU Y X, et al. Cover crops improve early season natural enemy recruitment and pest management in cotton production[J]. *Biological Control*, 2020, 141(C): 104149.
- [25] NIKOLAOS V, EMMANOUIL K, LEONIDAS R, et al. Effect of different cover crops, mass-trapping systems and environmental factors on invertebrate activity in table olive orchards: Results from field experiments in crete, greece[J]. *Agronomy*, 2022, 12(10): 2576.
- [26] LARKIN R P. Long-term effects of compost amendments and brassica green manures in potato cropping systems on soil and crop health and productivity[J]. *Agronomy*, 2022, 12(11): 2804.
- [27] HU L X, ZHANG X H, ZHOU Y H. Farm size and fertilizer sustainable use: An empirical study in Jiangsu, China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18 (12): 2898-2909.
- [28] 杜威, 王紫泉, 和文祥, 等. 豆科绿肥对渭北旱塬土壤养分及生态化学计量学特征影响[J]. *土壤学报*, 2017, 54(4): 999-1008.  
DU Wei, WANG Ziquan, HE Wenxiang, et al. Effects of leguminous green manure on soil nutrients and their ecological stoichiometry characteristics in Weibei Rainfed Highland[J]. *Acta Pedologica Sinica* Acta Pedol Sin, 2017, 54(4): 999-1008. (in Chinese with English abstract)
- [29] SILVEIRA M L, LIU K S, SOLLENBERGER L E, et al. Short-term effects of grazing intensity and nitrogen fertilization on soil organic carbon pools under perennial grass pastures in the southeastern USA[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 58: 42-49.
- [30] SANA R, AYMÉ S, HUGUES B, et al. Cover crop management practices rather than composition of cover crop mixtures affect bacterial communities in no-till agroecosystems[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, 10: 1618.
- [31] CHAPAGAIN T, LEE E A, RAIZADA M N. The potential of multi-species mixtures to diversify cover crop benefits[J]. *Sustainability*, 2020, 12(5): 2058.
- [32] 刘威, 耿明建, 秦自果, 等. 种植绿肥与稻秸协同还田对单季稻田土壤有机碳库和酶活性的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(7): 125-133.  
LIU Wei, GENG Mingjian, QIN Ziguang, et al. Effects of co-incorporation of green manure planting and rice straw on soil organic carbon pool and soil enzyme activity in a mono-rice cropping system[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(7): 125-133. (in Chinese with English abstract)
- [33] 李正鹏, 宋明丹, 李飞, 等. 青藏高原小麦秸秆和箭筈豌豆混合腐解规律和养分释放特征[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(11): 104-111.  
LI Zhengpeng, SONG Mingdan, LI Fei, et al. Decomposition and nutrient release characteristics of co-incorporated wheat straw and common vetch in Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(11): 104-111. (in Chinese with English abstract)
- [34] HANSEN E M, MUNKHOLM L J, OLESEN J E, et al. Nitrate leaching, yields and carbon sequestration after noninversion tillage, catch crops, and straw retention[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2015, 44(3): 868-881.
- [35] 章力干, 石心怡, 王玉宝, 等. 秸秆还田对中国主要粮食作物病害影响的 Meta 分析[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(21): 93-100.  
ZHANG Ligan, SHI Xinyi, WANG Yubao, et al. Meta-analysis for the impacts of straw return on the diseases of major grain crops in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(21): 93-100. (in Chinese with English abstract)
- [36] 兰延, 黄国勤, 杨滨娟, 等. 稻田绿肥轮作提高土壤养分增加有机碳库[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(13): 146-152.  
LAN Yan, HUANG Guoqin, YANG Binjuan, et al. Effect of green manure rotation on soil fertility and organic carbon pool[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2014, 30(13): 146-152. (in Chinese with English abstract)
- [37] YUAN C F, FENG S Y, WANG J, et al. Effects of irrigation water salinity on soil salt content distribution, soil physical properties and water use efficiency of maize for seed production in arid northwest China[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2018, 11(3): 137-145.
- [38] 刘燕青, 王计磊, 李子忠. 秸秆覆盖对土壤水分和侵蚀的影响研究进展[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(6): 429-436.  
LIU Yanqing, WANG Jilei, LI Zizhong. Research progress on the effects of straw on soil moisture and soil erosion[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(6): 429-436. (in Chinese with English abstract)
- [39] 孙万仓, 裴新梧, 马骊, 等. 我国北方冬季覆盖作物研究进展及发展前景[J]. *中国农业科技导报*, 2022, 24(1): 128-136.  
SUN Wancang, PEI Xinwu, MA Li, et al. Advances and outlook of winter cover crop research in northern China[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2022, 24(1): 128-136. (in Chinese with English abstract)
- [40] POULAMEE C, JASDEEP S, NAVDEEP S, et al. Assessing the influence of cover crop on soil water dynamics using soil moisture measurements and hydrus - 1D simulations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2022, 86(6): 1538-1552.
- [41] 尹晓宁, 董铁, 孙文泰, 等. 陇东旱地苹果园不同地面覆盖模式的水分与养分效应[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(20): 117-126.



- YIN Xiaoning, DONG Tie, SUN Wentai, et al. Effects of different soil surface mulching patterns on soil moisture and nutrient in dryland apple orchard in east Gansu Province[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(20): 117-126. (in Chinese with English abstract)
- [42] NICOLAS M, JACQUES-ERIC B, JULIE C, et al. Cover crops reduce drainage but not always soil water content due to interactions between rainfall distribution and management[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 231(C): 105998-105999.
- [43] MARCILLO G S, MIGUEZ F E. Corn yield response to winter cover crops: An updated meta-analysis[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 72(3): 226-239.
- [44] 付娟, 马仁明, 贾燕锋, 等. 机械压实对农田土壤性质及土壤侵蚀的影响研究进展 [J]. *农业工程学报*, 2022, 38 (增刊): 27-36.  
FU Juan, MA Renming, JIA Yanfeng, et al. Research progress in the effects of mechanical compaction on soil properties and soil erosion in farmland[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(Supp. ): 27-36. (in Chinese with English abstract)
- [45] WELCH R Y, BEHNKE G D, DAVIS A S, et al. Using cover crops in headlands of organic grain farms: Effects on soil properties, weeds and crop yields[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2016, 216: 322.
- [46] 王明亮, 刘惠芬, 王丽丽, 等. 不同覆盖作物模式对茶园土壤剖面物理性质的影响[J]. *天津师范大学学报 (自然科学版)*, 2020, 40(2): 56-62.  
WANG Mingliang, LIU Huifen, WANG Lili, et al. Effects of different cover crop patterns on physical properties of the soil profiles in tea garden[J]. *Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition)*, 2020, 40(2): 56-62. (in Chinese with English abstract)
- [47] 赵秋, 张新建, 宁晓光, 等. 华北农田冬绿肥覆盖的抗风蚀研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(8): 120-124.  
ZHAO Qiu, ZHANG Xinjian, NING Xiaoguang, et al. Influence of winter green manure on wind erosion in farmland of north China[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(8): 120-124. (in Chinese with English abstract)
- [48] DUNG T V, NGOC N P, DANG L V, et al. Impact of cover crop and mulching on soil physical properties and soil nutrients in a citrus orchard[J]. *PeerJ*, 2022, 10: e14170.
- [49] CALONEGO J C, RAPHAEL J P A, RIGON J P G, et al. Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling[J]. *European Journal of Agronomy*, 2017, 85: 31-37.
- [50] 曹锐. 覆盖作物栽培对土壤质量的影响[J]. *水土保持应用技术*, 2019(3): 10-12.  
CAO Rui. The impact of covering crop cultivation on soil quality[J]. *Technology of Soil and Water Conservation*, 2019(3): 10-12. (in Chinese with English abstract)
- [51] 张玲玲, 李青梅, 贾梦圆, 等. 覆盖作物对猕猴桃园土壤氨氧化微生物丰度和群落结构的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(3): 417-428.  
ZHANG Lingling, LI Qingmei, JIA Mengyuan, et al. Effects of cover crops on gene abundance and community structure of soil ammonia-oxidizing microorganism in a kiwifruit orchard[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(3): 417-428. (in Chinese with English abstract)
- [52] ADETUNJI A T, NCUBE B, MEYER A H, et al. Soil pH, nitrogen, phosphatase and urease activities in response to cover crop species, termination stage and termination method[J]. *Heliyon*, 2021, 7(1): e05980.
- [53] VANZOLINI J I, GALANTINI J A, MARTINEZ J M, et al. Changes in soil pH and phosphorus availability during decomposition of cover crop residues[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2017, 63(13): 1864-1874.
- [54] HERENCIA J F. Soil quality indicators in response to long-term cover crop management in a mediterranean organic olive system[J]. *Biological Agriculture & Horticulture*, 2018, 34 (4): 211-231.
- [55] 范玮玮, 信秀丽, 钟新月, 等. 玉米豆科覆盖作物间作对潮土酶活性和真菌群落特征的影响[J]. *土壤*, 2021, 53(6): 1236-1243.  
FAN Yiwei, XIN Xiuli, ZHONG Xinyue, et al. Effects of intercropping of maize and legume cover crops on enzyme activities and fungal community characteristics in fluvo-aquic soil[J]. *Soils*, 2021, 53(6): 1236-1243. (in Chinese with English abstract)
- [56] 乔月静, 郭来春, 葛军勇, 等. 燕麦与豆科作物间作对土壤酶活和微生物量的影响[J]. *甘肃农业大学学报*, 2020, 55(3): 54-61.  
QIAO Yuejing, GUO Laichun, GE Junyong, et al. Effects of oat-legume intercropping on soil enzyme activities and abundance of microbe[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2020, 55(3): 54-61. (in Chinese with English abstract)
- [57] 巴晓博, 隋鑫, 鲍雪莲, 等. 覆盖作物-玉米间作对土壤碳氮含量及相关酶活性的影响[J]. *土壤通报*, 2022, 53(3): 577-587.  
BA Xiaobo, SUI Xin, BAO Xuelian, et al. Impacts of intercropping with cover crops and maize on soil carbon and nitrogen contents and related enzyme activities[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(3): 577-587. (in Chinese with English abstract)
- [58] BLANCO - CANQUI H, SHAVER T M, LINDQUIST J L, et al. Cover crops and ecosystem services: Insights from studies in temperate soils[J]. *Agronomy Journal*, 2015, 107(6): 2449-2474.
- [59] FAÉ G S, SULC R M, BARKER D J, et al. Integrating winter annual forages into a no - till corn silage system[J]. *Agronomy Journal*, 2009, 101(5): 1286-1296.
- [60] 姜莉莉, 宫庆涛, 武海斌, 等. 不同生草处理对苹果园土壤微生物群落的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(10): 3482-3490.  
JIANG Lili, GONG Qingtao, WU Haibin, et al. Effects of different grasses cultivation on apple orchard soil microbial community[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(10): 3482-3490. (in Chinese with English abstract)

- [61] CHEN N, WEI R T, CAO X, et al. Evaluation of inter-row cover crops effects on the microbial diversity during Cabernet Sauvignon (*Vitis vinifera* L.) maturation[J]. *Food Research International*, 2022, 162: 112113.
- [62] 李青梅, 张玲玲, 刘红梅, 等. 覆盖作物多样性对猕猴桃园土壤微生物群落功能的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(2): 351-359.  
LI Qingmei, ZHANG Lingling, LIU Hongmei, et al. Effects of cover crop diversity on soil microbial community functions in a kiwifruit orchard[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2020, 39(2): 351-359. (in Chinese with English abstract)
- [63] SOMENAHALLY A, DUPONT J I, BRADY J, et al. Microbial communities in soil profile are more responsive to legacy effects of wheat-cover crop rotations than tillage systems[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 123: 126-135.
- [64] 刘娜. 重金属汞/镉低积累小麦品种筛选及根际微环境研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.  
LIU Na. Screening Low-or Low-Cadmium-Accumulating Wheat Cultivars and Exploring the Rhizosphere Microenvironment[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [65] 陈亚奎, 葛登文, 卢滇楠. 镉污染土壤的植物修复技术[J]. *环境生态学*, 2020, 2(9): 92-98.  
CHEN Yakui, GE Dengwen, LU Diannan. Phytoremediation for soil contaminated cadmium[J]. *Environmental Ecology*, 2020, 2(9): 92-98. (in Chinese with English abstract)
- [66] IFTIKHAR A, JAMIL K M, AZIZULLAH S, et al. Screening of various Brassica species for phytoremediation of heavy metals-contaminated soil of Lakki Marwat, Pakistan[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2022, 29(25): 37765-37776.
- [67] LIU Y, ZHUANG P, LI Z, et al. Cadmium accumulation in maize monoculture and intercropping with six legume species[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science*, 2013, 63(4): 376-382.
- [68] SITTI L, SYAMSU A, ENAL A, et al. Cover crop residue effects on soil and corn performance in ex-nickel mining soils[J]. *Pakistan Journal of Biological Sciences: PJBS*, 2021, 24(8): 888-894.
- [69] HAN Z Q, LIN H Y, XU P S, et al. Impact of organic fertilizer substitution and biochar amendment on net greenhouse gas budget in a tea plantation[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2022, 326: 107779.
- [70] ABDALLA M, HASTINGS A, CHENG K, et al. A critical review of the impacts of cover crops on nitrogen leaching, net greenhouse gas balance and crop productivity[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(8): 2530-2543.
- [71] GUARDIA G, ABALOS D, GARCIA-MARCO S, et al. Effect of cover crops on greenhouse gas emissions in an irrigated field under integrated soil fertility management[J]. *Biogeosciences*, 2016, 13(18): 5245-5257.
- [72] 戈小荣. 不同降水格局下填闲种植对旱作冬小麦农田土壤温室气体排放的影响[D]. 西安: 西北大学, 2018.  
GE Xiaorong. Effect of Cover Cropping on Greenhouse Gas Emissions in a Winter Wheat Farmland Under Different Rainfall Pattern[D]. Xi'an: Northwest University, 2018.
- [73] KAYE J P, QUEMADA M. Using cover crops to mitigate and adapt to climate change: A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2017, 37(1): 1-17.
- [74] 郑云普, 常志杰, 范晓懂, 等. CO<sub>2</sub> 浓度升高和磷素亏缺对黑麦草孔特征及气体交换参数的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(18): 82-89.  
ZHENG Yunpu, CHANG Zhijie, FAN Xiaodong, et al. Effects of CO<sub>2</sub> concentration increase and phosphorus deficiency on the stomatal traits and leaf gas exchange parameters of ryegrass[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(18): 82-89. (in Chinese with English abstract)
- [75] 刘亮, 张运鑫, 郝立华, 等. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度倍增和高温对玉米气孔特征及气体交换参数的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(22): 73-80.  
LIU Liang, ZHANG Yunxin, HAO Lihua, et al. Effects of double atmospheric CO<sub>2</sub> concentration and high temperature on the stomatal traits and leaf gas exchange of maize plants[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(22): 73-80. (in Chinese with English abstract)
- [76] SAMUEL I H, NSALAMBI V N. Influence of cover crop, tillage, and crop rotation management on soil nutrients[J]. *Agriculture*, 2020, 10(6): 225.
- [77] 李桂, 曹文华, 马建业, 等. 小麦秸秆覆盖量对坡面流体力学特性影响[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(1): 108-116.  
LI Gui, CAO Wenhua, MA Jianye, et al. Effect of wheat straw mulch on slope hydrodynamic characteristics[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(1): 108-116. (in Chinese with English abstract)
- [78] ELHAKEEM A, PORRE R J, HOFFLAND E, et al. Radish-based cover crop mixtures mitigate leaching and increase availability of nitrogen to the cash crop[J]. *Field Crops Research*, 2023, 292: 108803.
- [79] 杜璇, 冯浩, MATTHEW J H, 等. DRAINMOD-N II 模拟冬季长期覆盖黑麦对地下排水及 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 流失的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(12): 153-161.  
DU Xuan, FENG Hao, MATTHEW J H, et al. Simulating effects of winter rye cover on subsurface drainage and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N loss based on DRAINMOD-N II[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(12): 153-161. (in Chinese with English abstract)
- [80] 侯素素, 董心怡, 戴志刚, 等. 基于田间试验的秸秆还田化肥替代潜力综合分析[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(5): 70-78.  
HOU Susu, DONG Xinyi, DAI Zhigang, et al. Comprehensive analysis of chemical fertilizer replacement potential by straw returning in field experiments[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(5): 70-78. (in Chinese with English abstract)
- [81] UTTAM K, KAAG T I, JØRGEN E, et al. Delaying sowing of



- cover crops decreases the ability to reduce nitrate leaching[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2023, 355: 108598.
- [82] MBUTHIA L W, ACOSTA-MARTÍNEZ V, DEBRUYN J, et al. Long term tillage, cover crop, and fertilization effects on microbial community structure, activity: Implications for soil quality[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 89: 24-34.
- [83] SCHMIDT R, GRAVUER K, BOSSANGE A V, et al. Long-term use of cover crops and no-till shift soil microbial community life strategies in agricultural soil[J]. *Plos One*, 2018, 13(2): e0192953.
- [84] 刘俊英, 回金峰, 孙梦瑶, 等. 施磷水平和接种 AMF 与解磷细菌对苜蓿产量及磷素利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(19): 142-149.
- LIU Junying, HUI Jinpeng, SUN Mengyao, et al. Effects of phosphorus application and inoculation arbuscular mycorrhizae fungi (AMF) and phosphate solubilizing bacteria on dry matter yield and phosphorus use efficiency of alfalfa[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(19): 142-149. (in Chinese with English abstract)
- [85] 何娜娜. 黄土丘陵区三种覆盖作物根系吸水规律及其影响因素研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- HE Nana. Study on the Law of Root Water Uptake and Influencing Factors of Three Cover Crops in the Loess Hilly Region[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021.
- [86] 杨凯, 赵军, 赵允格, 等. 生物结皮坡面不同降雨历时的产流特征[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(23): 135-141.
- YANG Kai, ZHAO Jun, ZHAO Yunge, et al. Characteristics of runoff on biological soil crust slope in different rainfall durations[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(23): 135-141. (in Chinese with English abstract)
- [87] 孙福海, 肖波, 李胜龙, 等. 黄土高原藓类生物结皮对表层土壤水分运动参数的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(14): 79-88.
- SUN Fuhai, XIAO Bo, LI Shenglong, et al. Effects of moss-dominated biocrusts on surface soil-water movement parameters in the Chinese Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(14): 79-88. (in Chinese with English abstract)
- [88] 毛正君, 张瑾鸽, 毕银丽, 等. 紫花苜蓿对黄土边坡浅层破坏防护时间效应的数值分析[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(15): 72-83.
- MAO Zhengjun, ZHANG Jingge, BI Yinli, et al. Numerical analysis of protection time effect on planting alfalfa in loess slope with shallow failure[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(15): 72-83. (in Chinese with English abstract)
- [89] 王立春, 王永军, 边少锋, 等. 吉林省玉米高产高效绿色发展的理论与实践[J]. *吉林农业大学学报*, 2018, 40(4): 383-392.
- WANG Lichun, WANG Yongjun, BIAN Shaofeng, et al. Theory and practice of high yield, high efficiency and green development of maize in Jilin province[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2018, 40(4): 383-392. (in Chinese with English abstract)
- [90] 李少昆, 赵久然, 董树亭, 等. 中国玉米栽培研究进展与展望[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(11): 1941-1959.
- LI Shaokun, ZHAO Jiuran, DONG Shuting, et al. Advances and prospects of maize cultivation in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(11): 1941-1959. (in Chinese with English abstract)
- [91] 李保国, 刘忠, 黄峰, 等. 巩固黑土地粮仓保障国家粮食安全[J]. *中国科学院院刊*, 2021, 36(10): 1184-1193.
- LI Baoguo, LIU Zhong, HUANG Feng, et al. Ensuring national food security by strengthening high-productivity black soil granary in Northeast China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(10): 1184-1193. (in Chinese with English abstract)
- [92] MCCONNELL C A, ROZUM R K N, SHI Y N, et al. Tradeoffs when interseeding cover crops into corn across the Chesapeake Bay watershed[J]. *Agricultural Systems*, 2023, 209: 103684.
- [93] 蔡丽君, 张敬涛, 盖志佳, 等. 东北三江平原覆盖作物种植效果[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(10): 2736-2742.
- CAI Lijun, ZHANG Jingtao, GAI Zhijia, et al. The planting effect of cover crop in Sanjiang plain, northeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(10): 2736-2742. (in Chinese with English abstract)
- [94] 吕陇, 张登奎, 王琦, 等. 三叶草活覆盖对杂草、捕食性节肢动物和作物产量的影响[J/OL]. *生态学杂志*, 2022, 1-10. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20221205.1436.001.html>.
- LYU Long, ZHANG Dengkui, WANG Qi, et al. Effects of clover living mulches on weeds, predatory arthropods, and crop yield in maize and soybean production[J/OL]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 1-10. (in Chinese with English abstract) <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20221205.1436.001.html>.
- [95] 匡兵, 范翔宇, 卢新海. 中国耕地利用绿色转型效率的时空分异特征及其影响因素[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(21): 269-277.
- KUANG Bing, FAN Xiangyu, LU Xinhai. Spatial-temporal differentiation characteristics of the efficiency of green transformation of cultivated land use and its affecting factors in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(21): 269-277. (in Chinese with English abstract)
- [96] 陈浮, 曾思燕, 葛小平, 等. 资源环境硬约束下中国耕地休耕优先区识别[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(22): 226-235.
- CHEN Fu, ZENG Siyan, GE Xiaoping, et al. Identifying the fallow priority areas of cultivated land under resources and environmental constraints in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(22): 226-235. (in Chinese with English abstract)

## Research progress on benefits and rational selection of cover crops

ZHANG Jianheng<sup>1,2,3,4</sup>, ZHANG Yixing<sup>1</sup>, HOU Saisai<sup>5</sup>, LI Hongbo<sup>6</sup>, ZHANG Ruifang<sup>1,2,3</sup>,  
WANG Hong<sup>1,2,3</sup>, WANG Xinxin<sup>1,2,3\*</sup>

(1. National Research Center of Agricultural Engineering Technology in Northern Mountainous Areas, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China; 2. Hebei Mountainous Agricultural Technology Innovation Center, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China; 3. Hebei Institute of Mountainous Areas, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China; 4. Key Laboratory of North China Water-Saving Agriculture of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Baoding, 071001; 5. College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China; 6. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

**Abstract:** Chemical fertilizers and pesticides are widely used to remove the pests and weeds for the high grain yield in crop planting systems. However, the sustainable production has been restricted by some negative impacts on the soil and ecological environment. Fortunately, a new conservation tillage measure, covering crop planting can be adopted to realize the sustainable development of agriculture. This review aims to explore the research progress on benefits and rational selection of cover crops in agricultural production. A visual analysis with the keyword "cover crops" was firstly performed on the current research status using the CNKI database. It was found that the current number of publications increased to reach a peak in 2020. The research fields of cover crops included basic agricultural science, crop science, agronomy, plant protection, biology, environmental science and resource utilization. Cover crops method has been the multidisciplinary research object. The current research of cover crops was focused mainly on the impact of cover crops on the soil and subsequent crops, including the soil organic carbon and nitrogen sequestration, weed and pest inhibition, the improvement of soil physical and chemical properties, and the impact on soil microbial activity. A systematic summary was proposed to clarify the effects of cover crops on the soil nutrients, moisture, pH value, physical indicators (including soil bulk density and total porosity), biological indicators (including soil enzyme activity and soil microbial diversity), and environmental factors (including greenhouse gas emissions, heavy metals, and water environment). In addition, the rest benefits of cover crops were also involved as well. Cover crops method were taken as a new strategy to achieve the sustainable agricultural production with the high yield of main crops, in order to produce numerous ecological service functions, such as reducing soil erosion and nutrient loss. However, there were great differences in the natural resource endowments, such as the climate in the north and south of China. Not all cover crops were produced better ecological service functions in different places. Particularly, cover crops were also led to some adverse impacts under the stress of some natural conditions, such as the reduced crop yield and the increasing greenhouse gas emissions. Therefore, it is necessary to combine the local field microclimate, the selection of varieties, planting time and mode, when selecting cover crops. Moreover, the spread of cover crops was limited by the selection of cover crops, setting, termination, economic benefits, and uncertainty in the large-scale areas. Finally, the field management of cover crops and related subsidy policies were essential to the water quality optimization, soil erosion reduction, and soil carbon and greenhouse gas emissions reduction without significant yield reduction. The function of cover crops was attributed to the multiple factors, of which the influencing factor was precipitation. Furthermore, the cover crop traits were closely related to the temperature, evapotranspiration, and short growing season in the large-scale popularization. Therefore, the types of cover crops were recommended suitable for the different regions of China, together with their ecological functions and models. To sum up, this review can provide an essential basis for the rational selection and large-scale popularization of cover crops in the agricultural planting system, in order to improve the farmland ecological environment and sustainable development of agricultural production.

**Keywords:** crops; cultivation; cover; sustainable development; economic benefits; ecosystem services; genetic breeding