

DOI: 10.5846/stxb201703300554

王俊,薄晶晶,付鑫.填闲种植及其在黄土高原旱作农业区的可行性分析.生态学报,2018,38(14): - .

Wang J, Bo J J, Fu X. Research progress in cover cropping and its feasibility in the dryland farming systems on the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(14): - .

## 填闲种植及其在黄土高原旱作农业区的可行性分析

王 俊<sup>1,2,\*</sup>, 薄晶晶<sup>2</sup>, 付 鑫<sup>2</sup>

1 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127

2 西北大学城市与环境学院, 西安 710127

**摘要:**在主要粮食作物系统休闲期间种植填闲作物可兼顾环境与经济效益。本文综述了填闲种植对农田土壤水分、养分和后续粮食作物生产力形成等生态过程的影响及其具有的固碳减排、减少淋溶、控制侵蚀等环境与经济效益,并在此基础上从土壤水分限制、养分提高和产量经济效益等角度探讨了填闲种植在黄土高原旱作农业区的可行性,指出今后应重点加强填闲种植系统的水肥生产力形成机制、关键环境效益的形成机理、填闲作物与管理措施选择、生态经济效益评价以及气候变化背景下的填闲种植系统综合效益评估等方面展开定位观测与模型模拟研究,为填闲种植在黄土高原旱作农业区的推广提供科学依据。

**关键词:**填闲作物;旱作农田;可行性分析;黄土高原

## Research progress in cover cropping and its feasibility in the dryland farming systems on the Loess Plateau

WANG Jun<sup>1,2,\*</sup>, BO Jingjing<sup>2</sup>, FU Xin<sup>2</sup>

1 Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an 710127, China

2 College of Urban and Environment Science, Northwest University, Xi'an 710127, China

**Abstract:** Cover cropping during the fallow period would aid crop production and achieve environmental and economic benefits by enhancing soil water and nutrient cycling, while ameliorating soil structure in the farming system. In this paper, we reviewed the effects of cover cropping on soil water, fertility, crop yield, and its environmental (carbon sequestration, reduction of leaching, and erosion prevention) and economic benefits. The feasibility of cover cropping in the dryland farming systems on the Loess Plateau was discussed in terms of its effects on water as a limiting factor, improvements of soil fertility, and enhancements of crop production. Field studies and modelling works on cover cropping systems were related to the processes of soil water, soil carbon and nitrogen, crop production, environmental and economic benefits, and selections of cover crop type and management practices. Comprehensive assessments in the context of climate change should be given more attention in the future, which would provide a scientific basis for the extension of the cover cropping system to the Loess Plateau.

**Key Words:** cover crop; dryland farming system; feasibility analysis; the Loess Plateau

寻找可持续的管理措施以实现农田生态系统稳产、固碳、增益目标是当前农业生态学研究的主要任务之一<sup>[1]</sup>。在主要粮食作物收获至播种的休闲期间种植填闲作物(cover crop 或 catch crop)<sup>[2-3]</sup>可以增加地表覆

基金项目:国家自然科学基金面上项目(31570440,31270484)

收稿日期:2017-03-30; 网络出版日期:2018-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangj@nwu.edu.cn

盖,保护土壤。填闲作物通常并不用于经济生产,但在其生长期,可以通过生物量积累摄取土壤中多余养分,用于降低土壤硝态氮淋溶,防止土壤和水体污染<sup>[4]</sup>。而在粮食生产系统中,填闲作物通常在生长一定时间后可以翻耕入土用作绿肥(*green manure*)以补充土壤养分供应或者刈割收获后用作饲草<sup>[5-6]</sup>。已有研究表明,这种耕种方式具有改良土壤结构、增加额外碳输入、促进养分循环、刺激微生物活性、提高土壤肥力和作物产量、抑制杂草生长和病虫害以及控制土壤侵蚀等多种生态效益<sup>[7]</sup>,因此,近年来在世界很多地区得到了大面积推广。

黄土高原地区是我国主要的旱作农业区之一,农业生产以种植业为主,种植业又以粮食作物为主。除具有灌溉条件的地区外,其他地区大部分采用旱作一年一熟的耕作制度,其中以小麦和玉米单作一熟制最为常见<sup>[8]</sup>。在这种传统耕作制度中,无论是夏粮区还是秋粮区,粮食作物收获后均会出现几个月的休闲期。以冬小麦系统为例,每年6月中下旬小麦收获,9月中下旬播种,期间伴随约3个月的夏季休闲用于储存降水。然而休闲期间正值雨季与夏季高温并行,大量水分由裸土表面蒸发损失,降雨利用效率较低<sup>[9]</sup>。在降水有限的条件下,系统高生产力的维持需要持续的肥料投入,而这又会引起温室气体排放增加及土壤硝态氮淋溶等系列环境问题。因此,能否考虑将填闲作物代替裸地,建立一个可持续的粮食作物-填闲作物轮作系统以实现稳产、固碳、减排目标是一个值得深入探讨的命题。本文通过文献梳理,分析填闲作物种植引起的农田土壤水、肥、生产力等生态过程以及环境和经济效益形成过程的变化规律,旨在探讨填闲种植在黄土高原旱作农业区的可行性。

## 1 填闲种植研究进展

### 1.1 填闲种植的土壤生态效应

与传统裸地休闲相比,引种填闲作物其生长、翻压、腐解过程均对土壤生态过程产生了显著影响,具体表现在改变水分循环、改善养分供应、刺激微生物活动和改良土壤结构等几个方面。

填闲种植对农田土壤水分循环的影响主要体现在生长耗水、抑制蒸发和增强土壤保水能力三个方面。而对后续粮食作物而言,最重要的是休闲期间的降水储存效率、播前土壤水分贮量以及水分周年平衡是否会发生显著变化。与裸地休闲相比,填闲作物生长过程中需要蒸腾耗水,因此如果遭遇严重干旱年份,填闲作物自身生长需水较大或者管理不当(例如没有提前收割),填闲种植可能会导致土壤水分的过度消耗。已有研究表明,填闲种植对土壤水分平衡的影响程度与当地气候条件、填闲作物类型和管理措施(如种植时间长短、收割方式等)有关。例如 Ward 等<sup>[10]</sup>在澳大利亚西南部、Restovich 等<sup>[11]</sup>在南美潘帕斯地区以及 Wish 等<sup>[12]</sup>进行的模拟研究均表明,种植填闲作物对旱作农田水分平衡以及后续粮食作物水分利用并没有产生很大影响。Krueger 等<sup>[13]</sup>在美国西部玉米单一连作系统研究发现,冬季填闲作物(黑麦草)在玉米播种前2—4周终止对土壤水分没有影响,但如果推迟到播种前2天收割则加剧了土壤水分消耗。而 Daigh 等<sup>[14]</sup>在美国中西部地区发现,在极端干旱年份,在玉米-大豆轮作系统中引入黑麦草不仅没有降低土壤水分,反而改善了表层土壤水分条件。究其原因,可能在于填闲种植改善了土壤物理结构,包括降低土壤容重<sup>[15]</sup>、提高土壤孔隙度和透气性<sup>[16]</sup>、提高土壤持水能力和水分入渗能力<sup>[17]</sup>等。例如 Blanco-Canqui 等<sup>[17]</sup>进行的15年长期试验研究表明,土壤入渗能力在种植填闲作物后提高了3倍。另外与裸地相比,填闲种植显著增加了地表覆盖,也有助于土壤水分保护与恢复<sup>[10]</sup>。

除了影响土壤水分循环外,引种填闲作物也直接改变了土壤碳氮循环过程和土壤养分的有效性。与裸地休闲相比,种植填闲作物增加了额外的碳输入,因此被认为是一种非常有效的农业固碳措施<sup>[3, 18-19]</sup>。Poeplau 等<sup>[3]</sup>进行的一项文献分析研究发现,填闲种植系统表层土壤有机碳年均增加速率可达 $(0.32 \pm 0.08) \text{ Mg/hm}^2$ ,全球尺度固碳潜力可达到 $(0.12 \pm 0.03) \text{ Pg C a}^{-1}$ 。尽管多数研究均显示土壤有机碳在填闲种植后显著增加,但其增加幅度取决于气候(尤其是降水)、土壤质地、填闲作物类型以及管理方式等因素<sup>[18, 20-23]</sup>。例如 de Rouw 等<sup>[21]</sup>在热带地区试验表明,引种填闲作物种植并没有增加免耕系统的碳输入,沙质土壤由于团粒构成

较差, 种植冬季填闲作物带来的土壤碳输入也有限<sup>[23]</sup>。Sainju 等<sup>[24]</sup>在北美平原的研究表明, 在灌溉农业区填闲种植对提高土壤碳含量和土壤质量方面较旱作农田效果要更为明显。另外有研究表明, 豆科较非豆科填闲作物在将生物量碳固定成土壤碳方面似乎更为有高效<sup>[18,20,22]</sup>。例如 Mazzoncini 等<sup>[22]</sup>进行的 15 年长期试验研究表明, 非豆科填闲作物的固碳速率为  $0.17 \text{ Mg C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , 而豆科填闲作物则可达  $0.41\text{—}0.43 \text{ Mg C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。与冬季种植填闲作物相比, 夏季填闲作物由于具有更高的生物量输入, 其平均固碳速率和碳活化力 (lability) 也更高<sup>[19]</sup>。除此之外, 也有研究表明填闲作物在短期内对土壤有机碳含量无明显影响<sup>[25]</sup>, 但会改变土壤活性碳分组比例<sup>[24,26]</sup>。

与裸地休闲相比, 填闲种植还可以有效改善土壤养分供应能力。填闲作物根系残留 (地上部分用作饲草) 或翻压还田用作绿肥后, 其残余分解则可以为后续粮食作物提供一种“可更新的氮源”, 产生显著的“氮肥效应”, 减少农田化肥用量<sup>[5,27-30]</sup>。Hubbard 等<sup>[29]</sup>在美国东南部的 3 年试验表明, 填闲作物通过生物量输入可使土壤全氮含量提高  $0.1\text{—}0.5 \text{ mg/kg}$ 。Murungu 等<sup>[30]</sup>在南非的研究表明, 冬季填闲作物分解过程中可以释放出大量氮磷养分, 翻压 124 天后, 野豌豆生物量只剩了 7%, 最大净氮磷矿化分别达到了  $84.8 \text{ mg N kg}^{-1}$  和  $3.6 \text{ mg P kg}^{-1}$ , 而非豆科的燕麦干物质则剩了 40%, 氮磷净矿化则仅为  $13.7 \text{ mg N kg}^{-1}$  和  $2.8 \text{ mg P kg}^{-1}$ 。Ovalle 等<sup>[31]</sup>研究表明, 豆科填闲作物每年约有 10% 的生物量氮返回了土壤, 相当于 27%—30% 的化肥回收率。但需要注意填闲作物残余矿化释放氮磷养分与后续粮食作物养分吸收的同步性问题, 因为填闲作物作为绿肥使用时, 其真正意义上的养分贡献只有在后续粮食作物养分需求旺盛时期进行同期矿化释放才能成立。

引种填闲作物除了对土壤碳氮循环产生较大影响外, 也必然会影响到土壤的理化性质和微生物活动。Zhu 等<sup>[15]</sup>和 Blanco-Canqui 等<sup>[32]</sup>研究发现, 填闲作物使表层土壤容重降低了 4%, 且提高了土壤水分入渗能力和土壤团聚作用团聚体及稳定性。而 Chavarría 等<sup>[33]</sup>研究发现, 填闲种植显著增加了土壤总细菌和革兰氏阳性菌生物量, 并提高了土壤酶活性。赵娜等<sup>[34]</sup>在渭北旱区的研究结果表明, 种植不同的夏季绿肥均能够降低土壤容重, 提高土壤有机质和速效钾含量, 且 3 种绿肥处理土壤肥力和其他性状指标的无明显差异。而李红燕等<sup>[35]</sup>研究发现, 引种长武怀豆和油菜能够增加土壤的速效养分和酶活性, 培肥效果优于绿豆和毛叶苕子, 且生物量可能是其影响作用的主要控制因素。填闲种植对土壤理化性质和微生物活动的影响总体来说是正向的, 但相关机理研究还有待进一步深入。

## 1.2 填闲种植的环境效益

填闲种植的环境效益, 主要体现在影响温室气体排放、减少土壤氮淋溶和控制土壤侵蚀等方面。填闲作物翻耕入土后, 增加了底物供给, 直接改变了土壤温室气体排放过程<sup>[36]</sup>。多数研究表明, 引种填闲作物, 尤其在其作为绿肥期间显著刺激了土壤呼吸过程<sup>[36-38]</sup>, 其中填闲作物生物量和土壤碳氮比是两个主要影响因素<sup>[31]</sup>。Bavin 等<sup>[38]</sup>研究表明, 冬季种植黑麦草由于其残余分解显著提高了土壤  $\text{CO}_2$  累积释放量。根据 Basche 等<sup>[39]</sup>的文献分析, 约 60% 的试验结果显示填闲种植刺激了  $\text{N}_2\text{O}$  排放, 而另外的 40% 则报道了相反结果, 变异性主要来自于氮肥用量、填闲作物类型、翻耕与否、测定时间及降水状况, 尤其是降水量及其变率越高, 填闲种植对土壤  $\text{NO}_2$  排放的刺激作用就越明显。而 Sanz-Cobena 等<sup>[36]</sup>在地中海地区农田系统的研究表明, 填闲种植显著促进了农田土壤  $\text{CO}_2$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放, 但对土壤  $\text{CH}_4$  吸收没有影响。需要注意的是, 填闲种植在刺激温室气体排放的同时也增加了土壤有机碳的输入, 填闲种植能否起到固碳减排效果主要取决于增加的碳输入能否足够补偿增加的温室气体排放<sup>[38]</sup>。

填闲作物除了增加土壤氮供应外, 在其生长期可以吸收土壤中前季剩余的硝态氮, 从而可以降低氮素淋溶, 防止土壤和地表水体污染<sup>[3-4,40-41]</sup>。Tonitto 等<sup>[2]</sup>综述指出, 种植非豆科和豆科填闲作物后土壤硝态氮淋溶平均可分别减少 70% 和 40%。Salmerón 等<sup>[42]</sup>的对美国灌溉玉米系统模拟结果也显示, 填闲种植导致硝态氮淋溶下降了 31%。然而近期基于北美和欧洲地区相关试验进行的一项 Meta 分析结果表明<sup>[43]</sup>, 种植冬季填闲作物对氮淋溶的影响存在较大变异, 从减少 78% 到增加 36%, 变异性主要来自于气候因子、土壤性质和管理措施 (尤其是粮食作物的氮肥用量)。近年来, 为了提高作物产量, 黄土高原地区氮肥施用量快速增加, 但

由于作物吸收移除的氮相对稳定,导致土壤氮残留也越来越大,深层矿质氮累积和氮淋溶现象也越来越严重,引种填闲作物可能是降低氮淋溶,控制土壤和水体污染的一个重要手段,相关工作尚未见报道。

填闲作物增加了地表覆盖,同时通常还具有很高的根系密度,能够显著改善土壤团聚作用和土壤强度<sup>[44-45]</sup>,从而产生良好的水土保持效益<sup>[32,46-47]</sup>。例如在北美平原地区,Griffin 等<sup>[47]</sup>发现,尽管引种黑麦草和红豆草对马铃薯集约种植系统的产量影响不大,但可以通过改良土壤结构、提高团粒稳定性来显著减少土壤侵蚀。Blanco-Canqui 等<sup>[32]</sup>的研究也表明,免耕冬小麦系统种植冬季或春季填闲作物后,土壤风蚀和水蚀敏感性均有显著下降。最近 Basche 等<sup>[48]</sup>利用 APSIM 模型模拟研究表明,冬季填闲系统在美国中西部地区能防止约 11%—29% 的土壤侵蚀,引种冬季填闲作物和免耕相结合后,由降水径流导致的土壤流失量降低了 90%,仅在填闲作物种植期间土壤侵蚀量较休闲处理降低了 98%。黄土高原土壤侵蚀严重,引种填闲作物能否改善本地区农田土壤结构、防止土壤侵蚀尚待进一步研究。

### 1.3 填闲种植的经济效益

填闲种植是否会影响到后续粮食作物的生长和产量形成主要取决于气候条件、填闲作物类型和管理方式等因素<sup>[49-51]</sup>。不少研究发现,由于较高的生物输入量改善了土壤肥力状况,填闲作物可以有效地提高后续作物产量<sup>[52-53]</sup>。例如 Balkom 等<sup>[52]</sup>的研究表明,与夏季休闲相比,夏季引种印度麻使后续玉米产量提高了 1.2 Mg/hm<sup>2</sup>。Bergkvist 等<sup>[53]</sup>在瑞典南部的试验研究表明,由于出色的供氮能力,在不施肥条件下种植豆科三叶草可使后续大麦干物质增加 1.9—2.4 Mg/hm<sup>2</sup>。然而 Tonitto 等<sup>[2]</sup>综述发现,非豆科冬季填闲作物对后续粮食作物产量影响不大,而引种豆科填闲作物后粮食作物产量较裸地休闲平均下降了约 10%,但由于减少了约 28% 的氮肥需求,因此对产量的总体影响仍是正面的。Kramberg 等<sup>[54]</sup>、Salmerón 等<sup>[55]</sup>的研究均表明,种植非豆科填闲作物会导致后续作物产量的下降。采用增施氮肥、混播等合理的管理方式有助于解决非豆科填闲作物对后续作物产量的负面影响问题。例如 Sainju 等进行的系列研究<sup>[20,24,56]</sup>发现,黑麦草与野豌豆作为填闲作物时混播要比各自单播更能提高后续粮食作物产量。

不同的作物种类和耕作措施将会影响到农业生产的整体成本,种植填闲作物能否在改善土壤质量和环境效益的同时提高其经济效益,是决定填闲种植是否被农民接受而得到广泛推广的重要因素,但目前相关研究相对较少。一方面,引种填闲作物会增加种植成本,这既包括填闲作物播种、收获和耕作过程产生的燃油、机械、劳动力等直接和间接的成本投入<sup>[57]</sup>,也包括填闲种植改变土壤水肥和产量形成过程产生的间接成本变化。国外学者 Igos 等<sup>[58]</sup>的研究结果表明,填闲种植黑麦草不会有额外的经济效益,并且由于种植成本的不确定性(填闲作物产品价格、燃油价格)等,在不同地区引种填闲作物对成本投入的增加幅度不同。然而,种植填闲作物尤其是豆科绿肥,能够显著提高土壤肥力,减少化肥投入,合理的填闲管理也能有效提高粮食作物产量,增加经济收入,因此填闲种植的经济效益可能并不一定就是负面的。例如 Chen 等<sup>[59]</sup>研究发现,在小麦连作体系中引种扁豆提高了后续小麦产量,从而提高了种植系统的经济效益,但是与将扁豆作为绿肥还田相比,先收获小扁豆籽粒并将剩余部分还田管理模式就有更高的经济效益。

## 2 填闲种植在黄土高原旱作农业区的可行性分析

### 2.1 填闲种植的土壤水分限制作用

黄土高原地区农业生产以旱作为主,干旱少雨是影响黄土高原农业生产的主要限制因素,而夏季休闲期时正值雨热同季,不仅光热资源白白浪费,而且地表因缺乏植被覆盖,大量水分以蒸发的形式损失,休闲期储水效率平均仅为 35%—40%<sup>[60]</sup>。根据作者在陕西长武进行的观测结果<sup>[9,61]</sup>,本地区冬小麦单一连作系统夏闲期降水贮存效率多年平均仅为 28%—34%,这意味着大约 60%—70% 的休闲期降水被无效蒸发。因此,引种填闲作物是否能够起到防止土壤蒸发,以及是否会过度消耗土壤水分进而影响到后续粮食作物生长是决定填闲种植在旱作农业区能否适用的首要问题<sup>[62]</sup>。

如前所述,填闲作物生长一方面会消耗土壤水分,另一方面则可以通过遮荫抑蒸降低水分损失,并通过改

良土壤物理结构来促进水分有效存贮。近年来,国内已有学者在黄土高原旱作农业区开展了绿肥填闲种植试验研究,但就填闲种植的水分效应而言仍存在较大矛盾。例如张树兰等<sup>[63]</sup>、仇化民等<sup>[64]</sup>进行的小麦试验结果表明,种植填闲作物并不会影响土壤水分以及下一季粮食作物的水分利用,甚至可以通过改善土壤团聚结构提高表层土壤含水量<sup>[65]</sup>。而邓建强等<sup>[66]</sup>对陇东旱塬冬小麦-饲草轮作的研究发现,引种饲用油菜显著降低了小麦播前土壤贮水量。李婧等<sup>[67]</sup>、赵娜等<sup>[68]</sup>在黄土高原南部进行的研究也表明,在冬小麦播前,夏闲期种植绿肥 0—200 cm 土层贮水量较夏季休闲相比降低了 17.3%—20.6%,对填闲作物进行提前翻压是避免土壤水分过度消耗的有效措施<sup>[67]</sup>。

填闲作物品种、降水状况以及有效的管理措施可能是限制填闲种植在黄土高原旱作农业区推广的关键因素。一方面,不同填闲作物对水分的需求状况存在较大差异(图 1)<sup>[69]</sup>,在旱作农业区应优先选择一年生宽叶、中低耗水作物品种,如夏季填闲系统中可以种植非豆科的珍珠米、狐尾草、苋菜和豆科的鹰嘴豆、豇豆等,冬季填闲系统中可以种植大麦、燕麦、黑麦草、紫花豌豆、小扁豆、羽扇豆、埃及三叶草等。另一方面,黄土高原地区降水多年平均年降水量等值线从东南部的 800 mm 左右递减至西北部不足 200 mm<sup>[70]</sup>,具有极大的时空变异性。根据张树兰等<sup>[63]</sup>、仇化民等<sup>[64]</sup>研究,在种植制度上一季有余、两季不足、年降水量 500 mm 左右的东南部半湿润易旱区地区,小麦收获后引种填闲作物是可行的。而在降水偏少的半干旱地区目前尚未见填闲种植系统的相关报道,需要开展区域降水梯度上的对比研究。另外本地区降水年内和年际间分配均极不均匀<sup>[70]</sup>,降水多集中在夏季休闲期。姚致远等<sup>[71]</sup>发现在夏休闲期降水丰富的年份,种植绿肥较裸地在小麦播前土壤贮水量减少了 9—60 mm,而在较干旱的年份,绿肥种植导致小麦播前土壤贮水量减少了 60—110 mm。因此,填闲种植要根据休闲期降雨量的多少而进行适时调整,通过控制填闲作物种植时间(提前翻压或收割)、降低种植密度等措施避免土壤水分过度消耗<sup>[67]</sup>。

## 2.2 填闲种植的肥力效应

黄土高原地区土壤有机质含量远低于全国平均水平<sup>[40]</sup>,填闲种植能否提高土壤有机质也引起国内不少学者关注。按照传统的填闲种植方式,填闲作物收获后大多被作为饲料和燃料移除(尤其是甘肃、宁夏、青海等地),由于土壤存留的根茬生物量有限,因此对土壤有机质的贡献并不大<sup>[56]</sup>。而如果将填闲作物翻压还田用作绿肥,则能起到显著的固碳效益。例如赵娜等<sup>[68]</sup>在陕西长武的试验发现,在小麦播种前种植并翻压一季长武怀豆较裸地对照耕层土壤有机质含量增加了 1.0 g/kg。姚志远等<sup>[71]</sup>研究也发现,与休闲处理相比,种植并翻压绿肥处理的土壤有机质、活性有机质含量在冬小麦收获后分别提高了 3.9%—11.7% 和 3.2%—7.6%,且绿肥种植在不施肥条件下对土壤有机碳的提高效果更为显著。除增加土壤有机质外,填闲种植在黄土高原地区也能够显著改善土壤氮素供应。例如张达斌等<sup>[5]</sup>研究表明,旱作冬小麦田夏闲豆科绿肥还田后土壤全氮含量增加了 4.5%—10.8%。赵娜等<sup>[34]</sup>则发现,与夏季休闲相比,绿肥翻压入土 4 周后土壤全氮含量就有增加的趋势,在小麦收获后,长武怀豆处理土壤全氮仍提高了 5.9%。而姚志远等<sup>[71]</sup>研究结果表明,引入豆科绿肥 4 年后,土壤全氮含量并没有明显变化。虽然不同研究地区引入绿肥对土壤全氮的影响效果不一,但在相同的施氮水平下,在夏闲期种植绿肥均会导致土壤矿化氮的提高。王峥等<sup>[72]</sup>研究发现,种植绿肥处理的土壤剖面都有明显的硝态氮积累峰,且绿肥还田对土壤硝态氮的影响主要发生在 200 cm 以上的土层,而李富翠等<sup>[73]</sup>研究发现,种植绿肥虽提高了硝态氮含量但对铵态氮含量没有影响。

需要注意的是,填闲作物种类和管理措施(播种、翻压、耕作、施肥等)对填闲种植的肥力效应具有显著影响。豆科填闲作物能够通过生物固氮作用为后续粮食作物提供更多的有效氮。由于碳氮比差异,豆科作物残余分解速度更快,其生物量氮的释放要更快速有效<sup>[2,67]</sup>。非豆科作物具有更好的吸氮能力,因此种植后容易导致土壤出现一个氮亏缺状态,另外由于具有较高的碳氮比,其残余分解时可能会造成土壤氮固定,因此非豆科填闲作物种植后一般需要增施氮肥加以补充土壤氮库<sup>[27]</sup>。胡铁成等<sup>[74]</sup>研究得出,引种 4 种不同豆科绿肥后 0—100 cm 土壤硝态氮积累量均有不同程度地提高,而引种非豆科绿肥则降低了硝态氮含量。目前来看,黄土高原地区的相关研究多集中在豆科绿肥种植,对非豆科填闲作物的固碳效果和养分释放能力的研究较少

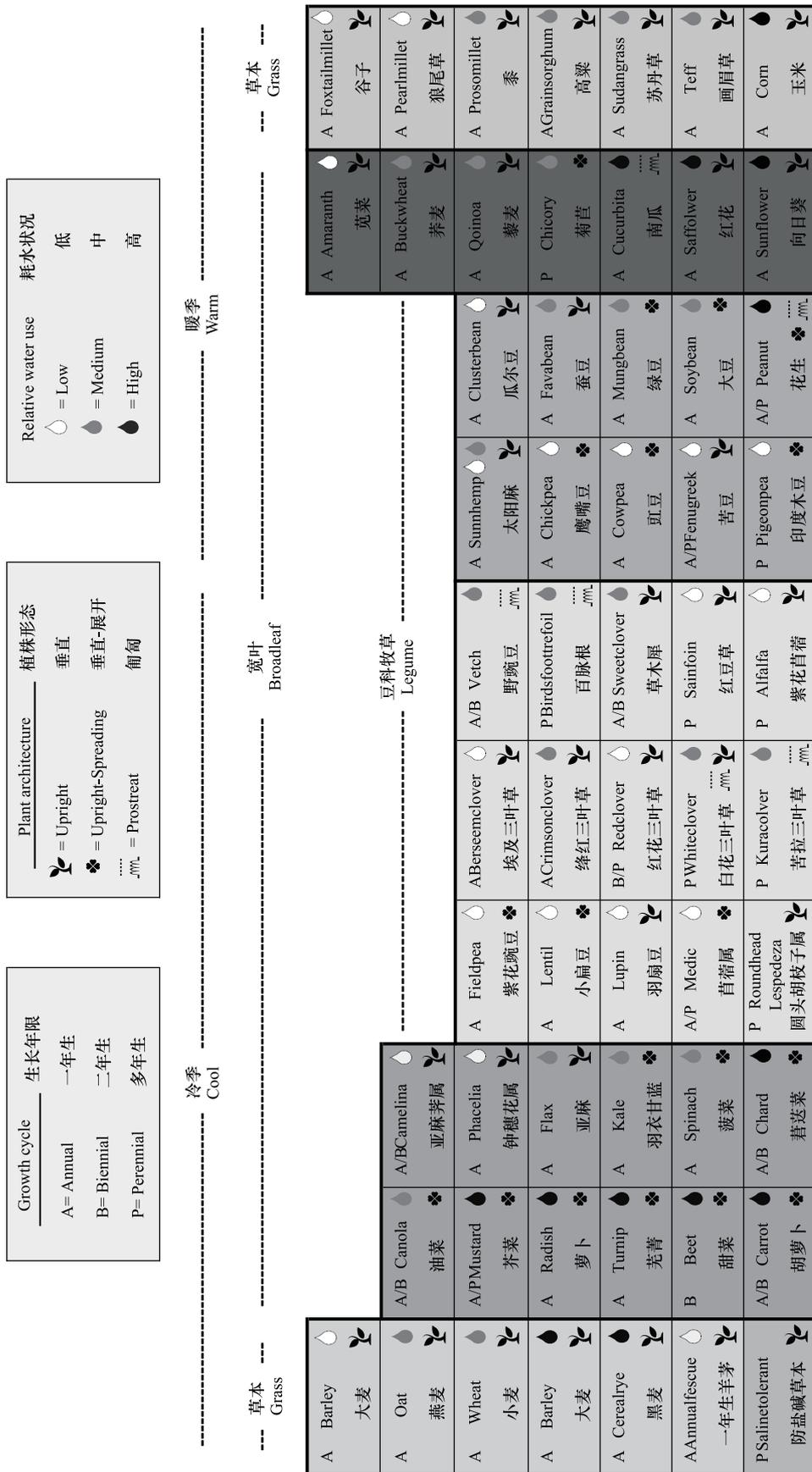


图 1 填充作物种类图<sup>[69]</sup>  
Fig.1 Cover crop chart

涉及。另外填闲作物的肥力效应可能与终止翻压时间、耕作与施肥等管理措施有关,例如 Sainju 等的研究<sup>[20,24,56]</sup>发现,豆科与非豆科填闲作物混播要比各自单播具有更高的固碳能力,并能显著提高土壤供氮水平。李红燕等<sup>[35]</sup>在黄土高原地区的研究发现,绿肥在小麦收获后播种的方式较小麦收获前播种对土壤养分的改善作用更为明显。而王峥等<sup>[72]</sup>研究结果表明,绿肥在小麦播前翻压处理的土壤有机质含量显著高于在小麦播种前 15 天翻压处理,表明绿肥播前翻压更有利于提升土壤肥力。此外,已有研究表明,绿肥对土壤肥力的影响与绿肥翻压的生物量有关,一定程度上翻压的生物量越大培肥效果越好<sup>[75]</sup>,若绿肥翻压的生物量过小则起不到改良土壤的作用,但过多作物秸秆还田会影响后续作物出苗率<sup>[2,54]</sup>,因此合理的绿肥翻压还田量也是有效改善土壤肥力的重要手段。

### 2.3 填闲种植的产量与经济效益

在黄土高原地区,引种填闲作物对后续作物产量的影响研究结果不一。张春等<sup>[75]</sup>进行的试验表明,夏闲期种植 4 种绿肥均可以不同程度的提高冬小麦产量,冬小麦的穗数、穗粒重和千粒重较裸地休闲处理分别提高了 30.5%—51.9%、27.6%—37.4% 和 3.8%—10.9%。杨宁等<sup>[76]</sup>则发现夏闲豆科绿肥与冬小麦轮作对后续冬小麦产量没有显著影响,但轮作第二季后冬小麦产量显著提高。而李可懿等<sup>[77]</sup>在陕西长武的试验发现,翻压一季豆科绿肥会导致后续小麦产量减低 9.7%—26.6%。赵娜等<sup>[68]</sup>则发现夏闲期种植绿肥显著降低了后续作物冬小麦的可用水量,其对小麦生长的影响从苗期就已经出现,并最终导致了产量的下降。

黄土高原地区降水匮乏,粮食作物产量通常不高,即使增加投入通常也不一定可以获得较高的产量,因此本地区的农民通常会选择成本最低的裸地休闲耕作方式。而部分农户在夏闲期会种植荞麦、糜子、蔬菜等填闲作物,其主要目的就是在粮食农作物受灾减产,还可以将这些作物用作饲料或燃料来弥补损失。惠文森<sup>[78]</sup>通过在休闲期种植三种不同的豆科牧草发现,引种豆科牧草不但不会对后续小麦生产造成不良影响,每亩还可以收获约 1000 kg 鲜草,产生较高的经济效益。然而姚志远等<sup>[79]</sup>研究表明,尽管在夏休闲期种植绿肥能减少氮肥的投入,但化肥成本的减少幅度相对于种子和田间管理成本的增加幅度来说几乎可以忽略不计,且豆科填闲作物收割时,其籽粒未能作为经济产物收获,填闲种植反而降低了冬小麦单一连作系统的经济收益。因此综合来看,通过抑蒸保墒和提高肥力,从而提高后续作物的产量和经济收入水平是填闲种植在黄土高原地区能否得到推广的关键因素,应合理选择耗水少的填闲作物品种(图 1)<sup>[69]</sup>,控制种植时间并降低种植密度,尽量避免出现土壤水分耗竭而导致后续粮食作物减产。

## 3 研究展望

作为典型的旱作农业区,干旱缺水、土壤肥力水平低是限制黄土高原地区农田土壤生产力提高的两个主要因素。如上所述,填闲种植系统具有改良土壤、提高土壤肥力和养分有效性,以及固碳减排、防止污染、控制侵蚀等多种生态效益,因此在本地区引入填闲种植来代替传统的裸地休闲方式,实现资源高效利用,对传统的旱作农田系统而言将是一个有益的尝试,具有一定的可行性。尽管近年来国内已有学者对引种豆科绿肥的土壤水分、养分和作物生产力效应已展开了不少试验性研究,但总体来看,填闲种植系统在黄土高原地区大面积推广的理论研究体系尚未建立。考虑到气候条件、填闲作物种类以及管理措施对填闲种植的重要影响,今后应对以下几个问题开展深入研究:

1) 填闲种植系统生产力形成机制。水肥是黄土高原旱作农田生产力形成的两个主要限制因素,然而填闲作物种植后引起的水分消耗与土壤养分提高相对于后续粮食作物生产而言是一对矛盾体。前者可能会直接影响当季作物生产,后者则有助于提高作物-土壤系统的可持续性,这也就是导致填闲种植系统作物产量出现波动的主要原因。因此,应结合区域气候条件,开展长期定位研究,将填闲种植的水肥两方面效应有效结合,开展不同区域和水热梯度上的对比观测研究,阐明填闲种植系统生产力的形成机制。

2) 填闲种植系统关键环境效益的形成机理。填闲种植增加了土壤有机碳的输入,但也可能刺激了温室气体排放,从作物-土壤系统角度分析能否真正起到固碳减排效果值得深入研究探讨。另一方面,填闲种植通

过吸收土壤中多余矿质养分、改善养分循环过程的同时也起到了减少污染和化肥使用的效果,但这种效果在化肥用量不断增加的黄土高原旱作农业区究竟如何尚不明确。另外黄土高原地区土壤侵蚀严重,引种填闲作物能否改善本地区农田土壤结构,保持水土,相关研究尚未见报道。需要针对填闲种植的固碳减排、减少淋溶污染和防止侵蚀等关键环境效益或影响的形成机理开展深入系统研究。

3) 填闲作物选择与管理措施问题。国内引种填闲作物种植研究较少,且大多数集中在豆科绿肥引种植措施的研究上。豆科和非豆科填闲作物对土壤水分、碳氮循环及环境等方面的影响作用差异明显,因此应选择合适的填闲作物,控制种植时间和田间管理方式来降低土壤水分消耗,改善土壤肥力。另外由于气候区和耕作制度差异,黄土高原地区夏闲期水热条件相对较好,填闲种植具有较强的可行性;而冬季休闲期相对时间周期较长,温度偏低,可以考虑引种耐低温低耗水的冬季填闲作物,这方面的工作尚待开展。另外在黄土高原“一年一熟”的寒旱区引种填闲作物,热量是否能够满足作物生长需求也需要进一步研究。

4) 填闲种植系统的生态经济评价。填闲作物种植系统的经济效益是影响填闲种植方式推广和应用的重要因素。如何在改善土壤质量和环境效益的同时,通过选择合理的填闲作物和耕作管理方式,降低成本投入,提高经济产出,今后需要针对不同的填闲种植系统开展生态经济分析研究。

5) 填闲种植系统生态经济效益综合评估。填闲种植在黄土高原地区具有大面积推广的理论基础,考虑到当前的全球气候变化背景,从生态系统可持续性角度分析,亟需在相关生态过程观测与机理分析研究的基础上,结合区域未来气候变化情景,针对旱作农田填闲种植系统的生产力形成、固碳减排、减少淋溶、防止侵蚀效益以及经济效益进行综合模拟和评估。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [ 2 ] Tonitto C, David M B, Drinkwater L E. Replacing bare fallows with cover crops in fertilizer-intensive cropping systems: a meta-analysis of crop yield and N dynamics. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2006, 112(1): 58-72.
- [ 3 ] Poepflau C, Don A. Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops—A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2015, 200: 33-41.
- [ 4 ] Fraser P M, Curtin D, Harrison-Kirk T, Meenken E D, Beare M H, Tabley F, Gillespie R N, Francis G S. Winter nitrate leaching under different tillage and winter cover crop management practices. *Soil Science Society of America Journal*, 2013, 77(4): 1391-1401.
- [ 5 ] 张达斌,姚鹏伟,李婧,赵娜,王峥,鱼昌为,曹群虎,曹卫东,高亚军. 豆科绿肥及施氮量对旱地麦田土壤主要肥力性状的影响. *生态学报*, 2013, 33(7): 2272-2281.
- [ 6 ] 赵娜,赵护兵,鱼昌为,曹群虎,李敏,曹卫东,高亚军. 旱地豆科绿肥腐解及养分释放动态研究. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(5): 1179-1187.
- [ 7 ] Schipanski M E, Barbercheck M, Douglas M R, Finney D M, Haider K, Kaye J P, Kemanian A R, Mortensen D A, Ryan M R, Tooker J, White C. A framework for evaluating ecosystem services provided by cover crops in agroecosystems. *Agricultural Systems*, 2014, 125: 12-22.
- [ 8 ] 李军. 黄土高原地区种植制度研究. 杨凌: 西北农林科技大学出版社, 2004.
- [ 9 ] Wang J, Liu W Z, Dang T H. Responses of soil water balance and precipitation storage efficiency to increased fertilizer application in winter wheat. *Plant and Soil*, 2011, 347(1-2): 41-51.
- [ 10 ] Ward P R, Flower K C, Cordingley N, Weeks C, Micin S F. Soil water balance with cover crops and conservation agriculture in a Mediterranean climate. *Field Crops Research*, 2012, 132: 33-39.
- [ 11 ] Restovich S B, Andriulo A E, Portela S I. Introduction of cover crops in a maize-soybean rotation of the Humid Pampas: effect on nitrogen and water dynamics. *Field Crops Research*, 2012, 128: 62-70.
- [ 12 ] Whish J P M, Price L, Castor P A. Do spring cover crops rob water and so reduce wheat yields in the northern grain zone of eastern Australia? *Crop and Pasture Science*, 2009, 60(6): 517-525.
- [ 13 ] Krueger E S, Ochsner T E, Porter P M, Baker J M. Winter rye cover crop management influences on soil water, soil nitrate, and corn development. *Agronomy Journal*, 2011, 103(2): 316-323.
- [ 14 ] Daigh A L, Helmers M J, Kladvik E, Zhou X, Goeken R, Cavdini J, Barker D, Sawyer J. Soil water during the drought of 2012 as affected by rye cover crops in fields in Iowa and Indiana. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 69(6): 564-573.

- [15] Zhu B, Yi L X, Guo L M, Chen G, Hu Y G, Tang H M, Xiao C F, Xiao X P, Yang G L, Acharya S N, Zeng Z H. Performance of two winter cover crops and their impacts on soil properties and two subsequent rice crops in Dongting Lake Plain, Hunan, China. *Soil and Tillage Research*, 2012, 124: 95-101.
- [16] Abdollahi L, Munkholm L J, Garbout A. Tillage system and cover crop effects on soil quality: II. Pore characteristics. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78(1): 271-279.
- [17] Blanco-Canqui H, Mikha M M, Presley D R, Claassen M M. Addition of cover crops enhances no-till potential for improving soil physical properties. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75(4): 1471-1482.
- [18] Sainju U M, Whitehead W F, Singh B P. Carbon accumulation in cotton, sorghum, and underlying soil as influenced by tillage, cover crops, and nitrogen fertilization. *Plant and Soil*, 2005, 273(1/2): 219-234.
- [19] Bayer C, Dieckow J, Amado T J C, Eltz F L F, Vieira F C B. Cover crop effects increasing carbon storage in a subtropical no-till Sandy Acrisol. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2009, 40(9-10): 1499-1511.
- [20] Sainju U M, Singh B P, Whitehead W F, Wang S. Carbon supply and storage in tilled and nontilled soils as influenced by cover crops and nitrogen fertilization. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35(4): 1507-1517.
- [21] De Rouw A, Huon S, Soulileuth B, Jouquet P, Pierret A, Ribolzi O, Valentin C, Bourdon E, Chantharath B. Possibilities of carbon and nitrogen sequestration under conventional tillage and no-till cover crop farming (Mekong valley, Laos). *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 136(1-2): 148-161.
- [22] Mazzoncini M, Sapkota T B, Bärberi P, Antichi D, Risaliti R. Long-term effect of tillage, nitrogen fertilization and cover crops on soil organic carbon and total nitrogen content. *Soil and Tillage Research*, 2011, 114(2): 165-174.
- [23] Po E A, Snapp S S, Kravchenko A. Rotational and cover crop determinants of soil structural stability and carbon in a potato system. *Agronomy Journal*, 2009, 101(1): 175-183.
- [24] Sainju U M, Schomberg H H, Singh B P, Whitehead W F, Tillman P G, Lachnicht-Weyers S L. Cover crop effect on soil carbon fractions under conservation tillage cotton. *Soil and Tillage Research*, 2007, 96(1-2): 205-218.
- [25] Reddy K N, Zablotowicz R M, Locke M A, Koger C H. Cover crop, tillage, and herbicide effects on weeds, soil properties, microbial populations, and soybean yield. *Weed Science*, 2003, 51(6): 987-994.
- [26] Amado T J C, Bayer C, Conceição P C, Spagnollo E, De Campos B H C, Da Veiga M. Potential of carbon accumulation in no-till soils with intensive use and cover crops in southern Brazil. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35(4): 1599-1607.
- [27] Blanco-Canqui H, Claassen M M, Presley D R. Summer cover crops fix Nitrogen, increase crop yield, and improve soil-crop relationships. *Agronomy Journal*, 2012, 104(1): 137-147.
- [28] Tosti G, Benincasa P, Farneselli M, Pace R, Tei F, Guiducci M, Thorup-Kristensen K. Green manuring effect of pure and mixed barley-hairy vetch winter cover crops on maize and processing tomato N nutrition. *European Journal of Agronomy*, 2012, 43: 136-146.
- [29] Hubbard R K, Strickland T C, Phatak S. Effects of cover crop systems on soil physical properties and carbon/nitrogen relationships in the coastal plain of southeastern USA. *Soil and Tillage Research*, 2013, 126: 276-283.
- [30] Murungu F S, Chiduzo C, Muchaonyerwa P, Mkeni P N S. Decomposition, nitrogen, and phosphorus mineralization from residues of summer-grown cover crops and suitability for a smallholder farming system in South Africa. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2011, 42(20): 2461-2472.
- [31] Ovalle C, Del Pozo A, Peoples M B, Lavin A. Estimating the contribution of nitrogen from legume cover crops to the nitrogen nutrition of grapevines using a  $^{15}\text{N}$  dilution technique. *Plant and Soil*, 2010, 334(1/2): 247-259.
- [32] Blanco-Canqui H, Holman J D, Schlegel A J, Tatarko J, Shaver T M. Replacing fallow with cover crops in a semiarid soil: effects on soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 2013, 77(3): 1026-1034.
- [33] Chavarría D N, Verdenelli R A, Serri D L, Restovich S B, Andriulo A E, Meriles J M, Vargas-Gil S. Effect of cover crops on microbial community structure and related enzyme activities and macronutrient availability. *European Journal of Soil Biology*, 2016, 76: 74-82.
- [34] 赵娜, 赵护兵, 曹群虎, 鱼昌为, 孙蔚, 李敏, 曹卫东, 高亚军. 渭北旱区夏闲期豆科绿肥对土壤肥力性状的影响. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(2): 124-128, 146.
- [35] 李红燕, 胡铁成, 曹群虎, 鱼昌为, 曹卫东, 黄冬琳, 翟丙年, 高亚军. 旱地不同绿肥品种和种植方式提高土壤肥力的效果. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(5): 1310-1318.
- [36] Sanz-Cobena A, García-Marco S, Quemada M, Gabriel J L, Almendros P, Vallejo A. Do cover crops enhance  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  or  $\text{CH}_4$  emissions from soil in Mediterranean arable systems? *Science of the Total Environment*, 2014, 466-467: 164-174.
- [37] Mancinelli R, Marinari S, Felice V D, Savin M C, Campiglia E. Soil property,  $\text{CO}_2$  emission and aridity index as agroecological indicators to assess the mineralization of cover crop green manure in a Mediterranean environment. *Ecological Indicators*, 2013, 34: 31-40.

- [38] Bavin T K, Griffis T J, Baker J M, Venterea R T. Impact of reduced tillage and cover cropping on the greenhouse gas budget of a maize/soybean rotation ecosystem. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 134(3-4): 234-242.
- [39] Basche A D, Miguez F E, Kaspar T C, Castellano M J. Do cover crops increase or decrease nitrous oxide emissions? A meta-analysis. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 69(6): 471-482.
- [40] Li F M, Wang T C, Cao J. Effect of organic matter on total amount and availability of nitrogen and phosphorus in loess soil of Northwest China. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1998, 29(7-8): 947-953.
- [41] Ritter W F, Scarborough R W, Chirside A E M. Winter cover crops as a best management practice for reducing nitrogen leaching. *Journal of Contaminant Hydrology*, 1998, 34(1-2): 1-15.
- [42] Salmerón M, Cavero J, Isla R, Porter C H, Jones J W, Boote K J. DSSAT nitrogen cycle simulation of cover crop-maize rotations under irrigated mediterranean conditions. *Agronomy Journal*, 2014, 106(4): 1283-1296.
- [43] Teixeira E I, Johnstone P, Chakwizira E, De Ruiter J, Malcolm B, Shaw N, Zyskowski R, Khaembah E, Shapp J, Meenken E, Fraser P, Thomas S, Brown H, Curtin D. Sources of variability in the effectiveness of winter cover crops for mitigating N leaching. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2016, 220: 226-235.
- [44] Qi Z, Helmers M J, Malone R W, Thorp K R. Simulating long-term impacts of winter rye cover crop on hydrologic cycling and nitrogen dynamics for a corn-soybean crop system. *Transactions of the ASABE*, 2011, 54(5): 1575-1588.
- [45] Mitchell J P, Shrestha A, Mathesius K, Scow K M, Southard R J, Haney R L, Schmidt R, Munk D S, Horwath W R. Cover cropping and no-tillage improve soil health in an arid irrigated cropping system in California's San Joaquin Valley, USA. *Soil and Tillage Research*, 2017, 165: 325-335.
- [46] De Baets S, Poesen J, Meersmans J, Serlet L. Cover crops and their erosion-reducing effects during concentrated flow erosion. *Catena*, 2011, 85(3): 237-244.
- [47] Griffin T S, Larkin R P, Honeycutt C W. Delayed tillage and cover crop effects in potato systems. *American Journal of Potato Research*, 2009, 86(2): 79-87.
- [48] Basche A D, Archontoulis S V, Kaspar T C, Jaynes D B, Parkin T B, Miguez F E. Simulating long-term impacts of cover crops and climate change on crop production and environmental outcomes in the Midwestern United States. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2016, 218: 95-106.
- [49] Andraski T W, Bundy L G. Cover crop effects on corn yield response to nitrogen on an irrigated sandy soil. *Agronomy Journal*, 2005, 97(4): 1239-1244.
- [50] Kuo S, Jellum E J. Long-term winter cover cropping effects on corn (*Zea mays* L.) production and soil nitrogen availability. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 31(6): 470-477.
- [51] Olson K R, Ebelhar S A, Lang J M. Cover crop effects on crop yields and soil organic carbon content. *Soil Science*, 2010, 175(2): 89-98.
- [52] Balkcom K S, Reeves D W. Sunn-hemp utilized as a legume cover crop for corn production. *Agronomy Journal*, 2005, 97(1): 26-31.
- [53] Bergkvist G, Stenberg M, Wetterlind J, Båth B, Elfstrand S. Clover cover crops under-sown in winter wheat increase yield of subsequent spring barley—Effect of N dose and companion grass. *Field Crops Research*, 2011, 120(2): 292-298.
- [54] Kramberger B, Gselman A, Janzekovic M, Kaligarić M, Bracko B. Effects of cover crops on soil mineral nitrogen and on the yield and nitrogen content of maize. *European Journal of Agronomy*, 2009, 31(2): 103-109.
- [55] Salmerón M, Cavero J, Quílez D, Isla R. Winter cover crops affect monoculture maize yield and nitrogen leaching under irrigated mediterranean conditions. *Agronomy Journal*, 2010, 102(6): 1700-1709.
- [56] Sainju U M, Singh B P. Nitrogen storage with cover crops and nitrogen fertilization in tilled and nontilled soils. *Agronomy Journal*, 2008, 100(3): 619-627.
- [57] Gabriel J L, Garrido A, Quemada M. Cover crops effect on farm benefits and nitrate leaching: linking economic and environmental analysis. *Agricultural Systems*, 2013, 121: 23-32.
- [58] Igos E, Golkowska K, Koster D, Vervisch B, Benetto E. Using rye as cover crop for bioenergy production: an environmental and economic assessment. *Biomass and Bioenergy*, 2016, 95: 116-123.
- [59] Chen C C, Neill K, Burgess M, Bekkerman A. Agronomic benefit and economic potential of introducing fall-seeded pea and lentil into conventional wheat-based crop rotations. *Agronomy Journal*, 2012, 104(2): 215-224.
- [60] Shanguan Z P, Shao M A, Lei T W, Fan T L. Runoff water management technologies for dryland agriculture on the Loess. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 2002, 9(4): 341-350.
- [61] Wang J, Liu W Z, Dang T H, Sainju U M. Nitrogen Fertilization Effect on Soil Water and Wheat Yield in the Chinese Loess Plateau. *Agronomy Journal*, 2013, 105: 143-149.
- [62] Unger P W, Vigil M F. Cover crop effects on soil water relationships. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1998, 53(3): 200-207.

- [63] 张树兰, Lovdahl L, 同延安. 渭北旱塬不同田间管理措施下冬小麦产量及水分利用效率. 农业工程学报, 2005, 21(4): 20-24.
- [64] 仇化民, 李怀德, 李桂芳. 陇东黄土高原麦茬绿肥保水增肥效应的研究. 自然资源, 1988, (3): 87-89.
- [65] 邵通桥, 杭朝平, 杨胜俊. 果园套种绿肥对果园土壤改良的效果. 贵州农业科学, 1999, 27(1): 35-37.
- [66] 邓建强, 梁志婷, 刘渊博, 王自奎, 沈禹颖. 陇东旱塬冬小麦复种饲草轮作系统产量和水分利用特征. 草业学报, 2017, 26(2): 161-170.
- [67] 李婧, 张达斌, 王峥, 姚鹏伟, 赵娜, 曹群虎, 鱼昌为, 曹卫东, 高亚军. 施肥和绿肥翻压方式对旱地冬小麦生长及土壤水分利用的影响. 干旱地区农业研究, 2012, 30(3): 136-142.
- [68] 赵娜, 赵护兵, 鱼昌为, 段长林, 李可懿, 曹群虎, 曹卫东, 高亚军. 夏闲期种植翻压绿肥和施氮量对冬小麦生长的影响. 西北农业学报, 2010, 19(12): 41-47.
- [69] USDA-ARS, Northern Great Plains Research Lab, 2015. [2017-12-09]. <https://www.ars.usda.gov/plains-area/mandan-nd/ngprl/docs/cover-crop-chart>.
- [70] 李志, 赵西宁. 1961—2009年黄土高原气象要素的时空变化分析. 自然资源学报, 2013, 28(2): 287-299.
- [71] 姚致远, 王峥, 李婧, 鱼昌为, 曹群虎, 曹卫东, 高亚军. 轮作及绿肥不同利用方式对作物产量和土壤肥力的影响. 应用生态学报, 2015, 26(8): 2329-2336.
- [72] 王峥, 梁颖, 姚鹏伟, 芦俊俊, 李婧, 黎志波, 鱼昌为, 曹群虎, 曹卫东, 高亚军. 绿肥播前施肥和翻压方式对旱地麦田土壤水肥性状的影响. 干旱地区农业研究, 2014, 32(3): 119-126.
- [73] 李富翠, 赵护兵, 王朝辉, 薛澄, 戴健, 孟晓瑜, 高亚军. 渭北旱地夏闲期秸秆还田和种植绿肥对土壤水分、养分和冬小麦产量的影响. 农业环境科学学报, 2011, 30(9): 1861-1871.
- [74] 胡铁成, 李红燕, 曹群虎, 鱼昌为, 曹卫东, 高亚军. 旱地不同绿肥品种及种植密度的肥饲效应研究. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(4): 44-52.
- [75] 张春, 杨万忠, 韩清芳, 王丹, 张坤, 丁静, 乔灵芝, 贾志宽. 夏闲期种植不同绿肥作物对土壤养分及冬小麦产量的影响. 干旱地区农业研究, 2014, 32(2): 66-72, 84.
- [76] 杨宁, 赵护兵, 王朝辉, 张达斌, 高亚军. 豆科作物-小麦轮作方式下旱地小麦花后干物质及养分累积、转移与产量的关系. 生态学报, 2012, 32(15): 4827-4835.
- [77] 李可懿, 王朝辉, 赵护兵, 赵娜, 高亚军, Lyons G. 黄土高原旱地小麦与豆科绿肥轮作及施氮对小麦产量和籽粒养分的影响. 干旱地区农业研究, 2011, 29(2): 110-116, 123.
- [78] 惠文森. 冬小麦与一年生豆科牧草复种试验. 西北民族学院学报: 自然科学版, 2000, 21(3): 52-54.
- [79] 姚致远, 王峥, 李婧, 鱼昌为, 曹群虎, 曹卫东, 高亚军. 旱地基于豆类绿肥不同轮作方式的经济效益分析. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 76-84.