中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture

黄土高原绿肥填闲种植的水分与产量效应：Meta分析

张少宏，王　俊，RAJANGhimire，邢文超，胡映明，张南南

Effect of green manure on soil water and crop yield in the Loess Plateau of China: A Meta-analysis

ZHANG Shaohong, WANG Jun, RAJAN Ghimire, XING Wenchao, HU Yingming, and ZHANG Nannan

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.210243

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

绿洲灌区玉米产量及水分利用对绿肥还田方式的响应

Response of maize yield and water use to different green manure utilization patterns in arid oasis irrigation area

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(5): 671–679

微润灌对作物产量及水分利用效率的影响

Effect of moistube–irrigation on crop yield and water use efficiency

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(11): 1671–1683

品种和播期对华北春玉米产量及水分利用效率的影响

Effects of sowing date and cultivar on grain yield and water use efficiency of spring maize in the North China Plain

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(6): 837–846

耕作与施肥对旱地玉米田土壤耗水量和水分利用效率的影响

Effect of tillage and fertilization on water use efficiency of maize in dryland conditions

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(6): 856–864

气候×基因型×水分管理对河北平原冬小麦产量和WUE的影响

Effect of climate, genotype, and water management on winter wheat yield and water use efficiency in Hebei Plain

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(2): 200–210

水分亏缺对不同小麦品种矿质元素吸收分布及水分利用的影响

Effect of water deficit on mineral element absorption, distribution and water utilization by different wheat varieties

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(10): 1475–1484

关注微信公众号，获得更多资讯信息

中国生态农业学报(中英文) 2021 年 11 月 第 29 卷 第 11 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Nov. 2021, 29(11): 1879−1892

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.210243

张少宏, 王俊, RAJAN Ghimire, 邢文超, 胡映明, 张南南. 黄土高原绿肥填闲种植的水分与产量效应：Meta 分析[J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2021, 29(11): 1879−1892
ZHANG S H, WANG J, RAJAN G, XING W C, HU Y M, ZHANG N N. Effect of green manure on soil water and crop yield in the Loess Plateau of China: A Meta-analysis[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(11): 1879−1892

黄土高原绿肥填闲种植的水分与产量效应：Meta 分析*

张少宏[1,2], 王 俊[1,2,3**], RAJAN Ghimire[4], 邢文超[1,2], 胡映明[1,2], 张南南[1,2]

(1. 西北大学城市与环境学院 西安 710127; 2. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室 西安 710127; 3. 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心 杨凌 712100; 4. New Mexico State University, Agricultural Science Center at Clovis, NM 88101, USA)

摘 要: 绿肥填闲种植是黄土高原旱作农业区一项历史悠久的种植方式, 但受降水资源限制, 绿肥种植可能会增加土壤水分消耗, 进而影响后茬粮食作物的产量。本研究基于 46 篇黄土高原绿肥相关文献数据, 采用整合分析 (Meta-analysis) 方法探究绿肥种植对休闲期降水储存效率 (PSE)、粮食作物播种时土壤储水量 (SWSP)、粮食作物产量、蒸散量 (ET) 和水分利用效率 (WUE) 的影响。结果表明, 与裸地休闲相比, 绿肥种植系统 PSE、SWSP 和 ET 分别降低 28.28%、4.93% 和 2.51% (P<0.05), 而后茬粮食作物产量和 WUE 平均提高 2.37% 和 8.97% (P<0.05)。绿肥填闲种植的水分和产量效应随绿肥翻压至后茬粮食作物播种间隔时间、绿肥生物量以及气候条件而发生变化。PSE、SWSP 和后茬粮食作物产量随豆科绿肥翻压至后茬粮食作物播种间隔时间的延长均呈先增加后减少变化, 指标的效应量 (response ratio, RR) 均在间隔时间约 13 d 时达最大。后茬粮食作物产量和 WUE 的 RR 与豆科绿肥生物量之间存在二项式相关, 并分别在绿肥生物量为 2200 kg·hm^{-2} 和 3100 kg·hm^{-2} 左右时达最大。总体来看, 黄土高原地区种植绿肥虽然降低了土壤水分, 但对后茬粮食作物产量形成和水分利用具有显著的促进作用, 提前 13 d 左右进行绿肥翻压、控制豆科绿肥生物量在 2200~3100 kg·hm^{-2} 能够有效减缓对土壤水分的负面影响。

关键词: 绿肥; 土壤水分; 产量; 水分利用效率; 整合分析

中图分类号: S152.7; S55 **开放科学码(资源服务)标识码(OSID):**

Effect of green manure on soil water and crop yield in the Loess Plateau of China: A Meta-analysis*

ZHANG Shaohong[1,2], WANG Jun[1,2,3**], RAJAN Ghimire[4], XING Wenchao[1,2], HU Yingming[1,2], ZHANG Nannan[1,2]

(1. College of Urban and Environment Science, Northwest University, Xi'an 710127, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an 710127, China; 3. Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling 712100, China; 4. New Mexico State University, Agricultural Science Center at Clovis, NM 88101, USA)

* 中国科学院"西部之光"西部引进人才项目、国家自然科学基金项目 (31570440)、陕西省国际科技合作与交流计划重点项目 (2020KWZ-010) 和陕西省农业科技创新驱动项目 (NYKJ-2021-XA-005) 资助

** 通信作者: 王俊, 主要研究方向为农田生态系统可持续管理研究。E-mail: wangj@nwu.edu.cn
张少宏, 主要研究方向为农田土壤水分研究。E-mail: 864646641@qq.com

收稿日期: 2021-04-28 接受日期: 2021-06-02

* This study was supported by the Chinese Academy of Science "Light of West China" Program for Introduced Talent in the West, the National Natural Science Foundation of China (31570440), the Key International Scientific and Technological Cooperation and Exchange Project of Shaanxi Province (2020KWZ-010), and Shaanxi Agricultural Science & Technology Innovation-driven Project (NYKJ-2021-XA-005).

** Corresponding author, E-mail: wangj@nwu.edu.cn

Received Apr. 28, 2021; accepted Jun. 2, 2021

Abstract: Planting green manure is a long-established planting pattern in the dryland cropping areas across the Loess Plateau of China. However, due to limited precipitation, planting green manure may reduce soil water content and affect the succeeding crop yield. By combining data from 46 peer-reviewed publications, a Meta-analysis was carried out to assess the effect of green manure on precipitation storage efficiency (PSE) during the fallow period, soil water storage at succeeding crop planting (SWSP), succeeding crop yields, evapotranspiration (ET), and water use efficiency (WUE) in the Loess Plateau of China. Compared to fallow areas without green manure, area with green manure decreased PSE, SWSP and ET by 28.28% (P<0.05), 4.93% (P<0.05) and 2.51% (P<0.05), respectively, however, it increased succeeding crop yield and WUE by 2.37% and 8.97% (P<0.05), respectively. Green manure effect on soil water, crop yield, and soil water use varied with the interval between green manure termination and planting of succeeding crop, green manure biomass, and climatic conditions. Strong polynomial relationship was found between the response ratios (RRs) of PSE, SWSP and the interval between legume green manure termination and succeeding crop planting. Both PSE and SWSP maximized at an interval of 13 d. The RRs of crop yield and WUE were also correlated with legume green manure biomass in a polynomial way. Succeeding crop yield and WUE maximized when the legume green manure biomass was 2200 and 3100 kg·hm^{-2}, respectively. Overall, introducing green manure during fallow period reduced soil water but enhanced succeeding crop production and water use in the Loess Plateau. Leaving a 12–14 d interval between legume green manure termination at a biomass of 2200–3100 kg·hm^{-2}, succeeding crop planting can be a reliable practice to mitigate soil water consumption in such dryland areas.

Keywords: Green manure; Soil water; Yield; Water use efficiency; Meta-analysis

推广减施增效技术、实现“藏粮于地、藏粮于技”是当前我国农业发展和粮食安全的重大国家战略。黄土高原是我国典型的旱作农业区, 受水热条件限制, 粮食作物多为一年 1 熟到两年 3 熟。粮食作物收获到下一季粮食作物播种存在一定时间的裸地休闲。即使夏季休闲期间降水充沛, 由于无植被覆盖和高温环境, 依然造成大量土壤水分无效蒸发[1]。在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), 一方面可以通过覆盖地表保护土壤, 吸收多余矿质养分, 降低污染风险; 另一方面其生长一定时间后翻耕入土也可作为绿肥 (green manure) 补充土壤养分, 提高土壤质量[1]。研究表明, 绿肥填闲种植具有增加土壤有机质、促进养分循环、改良土壤结构、增加微生物数量、抑制杂草和病虫害以及防止土壤侵蚀等多种生态效益[2-3]。历史上种植填闲作物是黄土高原旱作农田生态系统得以稳定持续的重要管理措施之一, 而在当前绿色化农业生产的新形式下, 亟待深化对绿肥填闲种植系统这一传统农业精华的理解。

与裸地休闲相比, 绿肥作物的“遮荫效应”可以减少土壤水分的无效蒸发[4-6], 翻压后能增加土壤中的有机物, 改善土壤的物理性质[7-9], 达到一定的保水目的。但是, 绿肥种植也可能会增加土壤水分消耗, 与后茬作物产生土壤水分的竞争性利用[4-5]。在旱作农业区, 绿肥作物对土壤水分的竞争性利用可能会直接影响到后茬粮食作物产量形成过程[1]。当前关于绿肥填闲种植土壤水分效应的研究结论存在争议。在黄土高原地区, 李小涵等[10]、李婧等[11]、张祺等[12]的观测结果表明, 夏季休闲期间种植豆科绿肥均显著增加了土壤水分消耗, 而张树兰等[13]研究表明, 绿肥种植对土壤水分平衡及后茬作物水分利用没有产生显著影响。而国外研究表明, 绿肥种植可以有效提高表层土壤含水量和田间持水量[2, 8, 14]。绿肥填闲种植的土壤水分效应可能与其生物量、田间管理措施以及土壤气候条件有关。水分匮乏是限制黄土高原旱作农业生产的关键因素, 休闲期引种绿肥作物是否会过度消耗土壤水分并进而影响后茬粮食作物产量形成和水分利用目前尚缺乏全面系统的评估。

本研究通过收集黄土高原地区相关绿肥填闲种植的田间试验数据, 基于整合分析方法, 定量探究了绿肥种植对休闲期降水储存效率 (PSE)、粮食作物播种时土壤储水量 (SWSP)、粮食作物产量、生育期蒸散量 (ET) 和水分利用效率 (WUE) 的影响, 并定量分析了绿肥作物生物量和翻压播种间隔时间与土壤水分、粮食作物产量和水分利用的关系, 旨在探讨本地区旱作农田绿肥填闲种植系统的水分生产力形成机制, 为其在黄土高原旱作农业区的恢复与推广提供科学依据与实践指导。

1 材料与方法

1.1 数据收集

以“绿肥作物 (green manure)”或“填闲作物 (cover crop 或 catch crop)”为关键词, 在 Web of Science、中国知网 (CNKI) 和百度学术等数据库进行检索, 检索日期截至 2020 年 6 月 15 日。然后基于以下标准进行文献筛选: 1) 试验地点在中国黄土高原地区; 2) 仅考虑田间试验数据, 所有室内培养试验、模型模拟和文献综述均不予考虑; 3) 同一试验设计必须包含绿肥种植试验组和裸地休闲对照组, 除此之外

其他田间管理措施需一致; 4) 研究结果中至少包含土壤水分、粮食作物产量和 WUE 中的一项; 5) 观测结果包含样本量、均值和标准误差; 6) 对不同研究的同一试验数据只纳入一次。经过筛选最终获得了 46 篇文献[11-12, 15-58]、486 组试验数据。本研究数据来源的试验地点分布如图 1 所示。

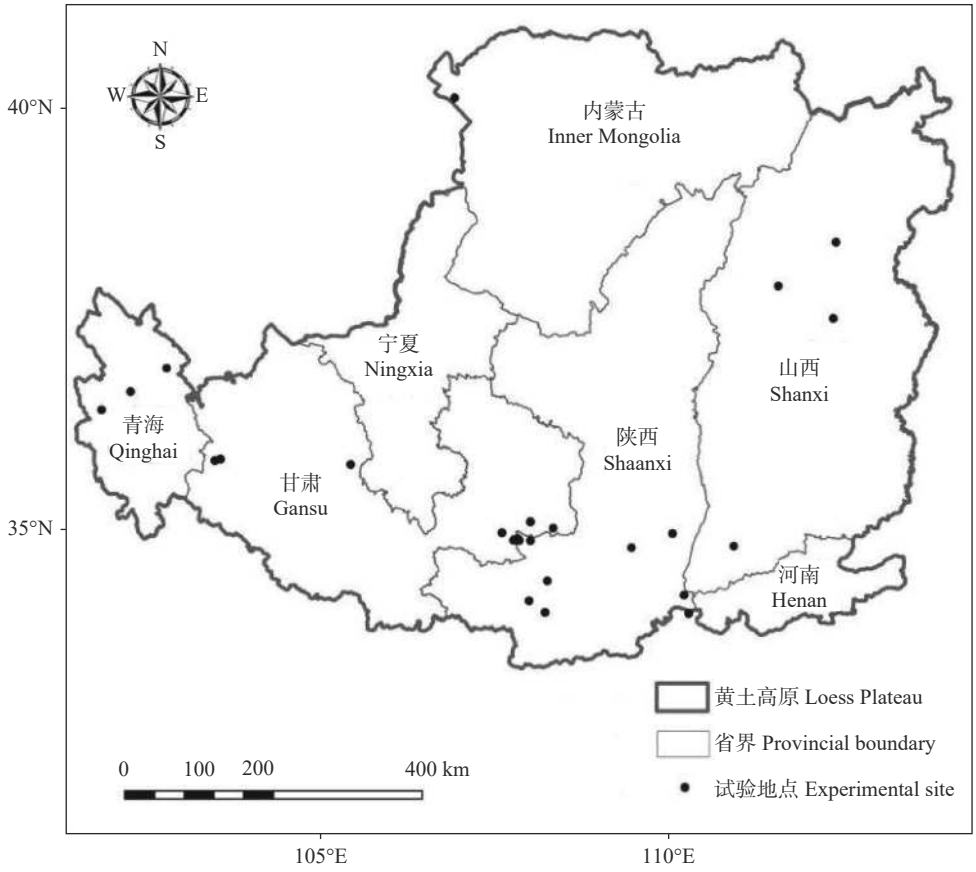

图 1　数据来源的试验地点分布

Fig. 1　Distribution of the experimental sites from which data was collected for the Meta-analysis

除 PSE、SWSP、粮食作物产量、ET 和 WUE 数据外, 还收集了包括各项田间试验研究的土壤初始有机碳 (SOC_i)、年均降水 (MAP)、休闲期降水和年均气温 (MAT) 数据, 另外收集了绿肥生物量干重数据。文献中缺乏试验所在地气象数据时, 通过国家气象信息中心中国气象数据网 (http://data.cma.cn) 进行获取。数据收集过程中, 对文字、表格形式展示的数据进行直接提取, 对以图形形式展示的数据使用 Getdata graph digitizer 2.26 (http://getdata-graph-digitizer.com/index.php) 进行提取。

采用以下公式分别计算土壤储水量 (SWS)、PSE、后茬粮食作物生育期 ET 和 WUE[12, 29]:

$$SWS = \sum_{i=1}^{n}(SWC_i \times BD_i \times D_i \times 10/100) \quad (1)$$

式中: SWC 为土壤重量含水量 ($g \cdot kg^{-1}$), BD 为土壤容重 ($g \cdot cm^{-3}$), D 为土层厚度 (cm), i 为土壤层次 2。

$$PSE = (SWSP - SWSH') \times 100/P_f \quad (2)$$

式中: SWSP 为粮食作物播种时土壤储水量 (mm), SWSH′为上一季粮食作物收获时土壤储水量 (mm), P_f 代表休闲期间降水量 (mm)。

$$ET = SWSP - SWSH + P_g \quad (3)$$

式中: SWSH 为后茬粮食作物收获期土壤储水量, P_g 为后茬粮食作物生长期间的降水量 (mm)。由于黄土高原地区土壤地下水补给深度超过 60 m, 且所获取的文献中田间试验均在平地开展, 因此在 ET 计算中不考虑地下水补给和地表径流。

$$WUE = Yield/ET \quad (4)$$

式中: Yield 为后茬粮食作物籽粒产量 ($kg \cdot hm^{-2}$)。

1.2　数据分析

使用 Metawin 2.1 软件 (Sinaure Associate Inc., Sunderland, USA) 对收集的数据进行整合分析 (Meta-analysis), 计算绿肥种植对 PSE、SWSP、后茬粮食作物产量、ET 和 WUE 的影响。数据包括绿肥种植和对照两组各观测指标的均值和标准差。部分文献不

含各指标的标准差, 但包含多个重复试验的数据, 或者以上两部分均未展示, 但包含多年试验的各指标数据时, 使用 SPSS 23.0 软件计算标准差[59]。

使用效应量 (response ratio, RR) 来反映绿肥种植对各观测指标的影响大小[60-61], 计算公式如下:

$$RR = \ln\left(\frac{X_c}{X_n}\right) = \ln(X_c) - \ln(X_n) \quad (5)$$

式中: X_c 为绿肥种植试验组的均值, X_n 为对照组均值。

RR 的方差 (V) 计算公式为:

$$V = \frac{S_c^2}{N_c X_c^2} + \frac{S_n^2}{N_n X_n^2} \quad (6)$$

式中, S_c 和 S_n 分别为绿肥种植试验组和对照组的标准差, N_c 和 N_n 分别为绿肥种植试验组和对照组的重复次数。每个 RR 的权重 (W) 计算公式为:

$$W = 1/V \quad (7)$$

数据分析过程中, 相比于较小的变异研究赋予较大变异更小的权重, 以消除研究中得到不等变异。总体 RR(RR_{E++}) 计算公式为:

$$RR_{E++} = \frac{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m} W_{ij} RR_{ij}}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} W_{ij}} \quad (8)$$

式中: n 为试验处理数, m 为每个类别的比较数。

RR_{E++}的标准差计算公式为:

$$SE(RR_{E++}) = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} W_{ij}}} \quad (9)$$

为了便于对结果的解释, 将总体 RR 转换为百分比变化率 RR(%), 相应的转换公式为[59]:

$$RR(\%) = (X_c/X_n - 1) \times 100\% \quad (10)$$

为便于分析和解释, 除 RR 外, 同时使用 RR 的 95% 置信区间进行表达。若总体效应量的 95% 置信区间全部小于 0, 表明绿肥填闲种植对该指标有显著的负面影响; 若 95% 置信区间包含 0, 说明绿肥填闲种植对该指标的影响不显著; 若区间范围大于 0, 表明绿肥填闲种植对该指标有显著的正面影响。

为进一步解释总体结果的变异性, 根据气候和土壤特性将数据库分成不同的子数据库, 进行分组整合分析。参照 Wang 等[62] 的气候分类方法, 按试验地点 MAP≤450 mm、450 mm<MAP<600 mm、MAP>600 mm 分别将试验地点划分为半干旱 (semi-arid)、半湿润易旱 (dry semi-humid) 和半湿润 (semi-humid) 地区。试验地点按 MAT≤8 ℃ 和>8 ℃ 分别划分为中温 (mid-temperate) 和温暖 (warm-temperate) 地区。田间试验土壤初始有机碳 (SOC_i) 含量 ($g \cdot kg^{-1}$) 划分为≤5、5~8、8~11 和>11 不同组别[62]。利用回归分析确定绿肥作物参数与 PSE、SWSP、粮食作物产量、ET 和 WUE 之间的关系。

使用 Metawin 2.1 软件 (Sinaure Associate Inc., Sunderland, USA) 检验数据异质性和发表偏倚。数据异质性包括总体异质性 (total heterogeneity)、组间异质性 (heterogeneity between-group) 和组内异质性 (heterogeneity within-group), 数值越大代表数据异质性越大。通过组间异质性来检验同一指标的效应量在不同亚组之间的差异[60]。通过计算失安全系数 (fail-safe number) 来判断发表偏倚[61], 其中失安全系数阈值为 ($5n$+10), n 为观察数。失安全系数低于阈值或无显著性排序表明本研究数据存在发表偏倚性问题。

2 结果与分析

2.1 休闲期降水储存效率和后茬粮食作物播种时土壤储水量

PSE 和 SWSP 的试验数据分别为 60 组和 202 组, 且均呈正态分布。表 1 和表 2 显示, PSE 和 SWSP 的数据异质性较高, 且不存在发表偏倚, 能够满足整合分析要求。

与裸地休闲相比, 绿肥种植 PSE 平均降低了 28.28% (P<0.05), 其中种植豆科绿肥 PSE 降低了 29.53%, 而非豆科绿肥仅有 3 组数据, 结果存在不确定性 (图 2a)。关于 PSE 的试验主要集中在半湿润温暖地区, 且绿肥种植对 PSE 的负效应在 SOC_i 为 5~8 $g \cdot kg^{-1}$ 时大于 8~11 $g \cdot kg^{-1}$。绿肥种植 SWSP 较裸地休闲降低了 4.93% (P<0.05), 其中豆科和非豆科绿肥降低幅度分别为 5.00% 和 4.00% (图 2b)。在半干旱或中温区绿肥种植对 SWSP 没有显著影响, 而在半湿润易旱区、半湿润区以及温暖地区均具有显著负效应。土壤 SOC_i<5 $g \cdot kg^{-1}$ 时绿肥种植对 SWSP 没有显著影响, 而当 SOC_i>5 $g \cdot kg^{-1}$ 时均呈显著负效应, 其中在 SOC_i>11 $g \cdot kg^{-1}$ 时的负效应显著大于 5~11 $g \cdot kg^{-1}$。

绿肥种植对 PSE 和 SWSP 的影响随绿肥翻压至后茬粮食作物播种间隔时间延长先增加后减少 (y=−0.0019x^2+0.0421x−0.2826; y=−0.0004x^2+0.0117x−0.1054), 其两个指标 RR 值在间隔 13 d 左右达最大 (图 3a、3b)。其中, 豆科绿肥变化趋势与总体一致; 受数据量限制, 种植非豆科绿肥 PSE 和 SWSP 的 RR

表 1　休闲期降水储存效率、后茬粮食作物播种时土壤储水量及后茬粮食作物产量、蒸散量和水分利用效率的数据异质性分析

Table 1　Data heterogeneity for precipitation storage efficiency during the fallow period, soil water storage at succeeding crop planting, succeeding crop yield, evapotranspiration, and water-use efficiency

变量 Variable	分组 Categorical group	总异质性 Total heterogeneity	组间异质性 Heterogeneity between-group	组内异质性 Heterogeneity within-group	组间*P*值 *P* value among groups
休闲期降水储存效率 Precipitation storage efficiency during the fallow period (PSE)	绿肥作物类型 Green manure species	70.42	2.62	67.81	0.139
	年均降水 Mean annual precipitation	—	—	—	—
	年均气温 Mean annual temperature	—	—	—	—
	土壤初始有机碳 Initial soil organic carbon	74.28	8.28	66.00	0.012
粮食作物播种时土壤储水 Soil water storage at succeeding crop planting (SWSP)	绿肥作物类型 Green manure species	221.69	0.18	221.69	0.656
	年均降水 Mean annual precipitation	229.21	10.85	218.36	0.019
	年均气温 Mean annual temperature	226.13	6.33	219.80	0.021
	土壤初始有机碳 Initial soil organic carbon	228.56	10.44	218.12	0.037
后茬粮食作物产量 Succeeding crop yield	绿肥作物类型 Green manure species	347.57	5.24	342.33	0.020
	年均降水 Mean annual precipitation	355.56	9.94	345.62	0.013
	年均气温 Mean annual temperature	346.09	1.84	344.25	0.169
	土壤初始有机碳 Initial soil organic carbon	358.97	8.09	350.87	0.016
蒸散量 Succeeding crop evapotranspiration	绿肥作物类型 Green manure species	106.52	0.0002	106.52	0.988
	年均降水 Mean annual precipitation	109.51	3.13	106.38	0.235
	年均气温 Mean annual temperature	108.57	1.58	107.00	0.202
	土壤初始有机碳 Initial soil organic carbon	106.32	1.35	104.96	0.523
水分利用效率 Succeeding crop water-use efficiency (WUE)	绿肥作物类型 Green manure species	80.33	1.94	78.39	0.163
	年均降水 Mean annual precipitation	83.64	5.61	78.03	0.054
	年均气温 Mean annual temperature	82.77	3.30	79.48	0.077
	土壤初始有机碳 Initial soil organic carbon	77.6	0.24	77.36	0.888

表 2　休闲期降水储存效率、后茬粮食作物播种时土壤储水量及后茬粮食作物产量、蒸散量和水分利用效率的数据分布 (高斯) 及发表偏倚性检验结果

Table 2　Data distribution (Gaussian test) and publication bias for precipitation storage efficiency during the fallow period, soil water storage at succeeding crop planting, succeeding crop yield, evapotranspiration and water-use efficiency

变量 Variable	观察组数 Number of observation (*n*)	正态分布(*P*值) Fitted Gaussian distribution (*P* value)	失安全系数 Fail-safe number (*N*)	"Rank-order correlation" *P*值 *P* value for Rank-order correlation
休闲期降水储存效率 Precipitation storage efficiency during the fallow period	60	<0.01	1415	0.1847
粮食作物播种时土壤储水量 Soil water storage at succeeding crop planting	202	<0.001	5282	0.1388
后茬粮食作物产量 Succeeding crop yield	368	<0.001	222	0.7811
蒸散量 Succeeding crop evapotranspiration	97	<0.01	181	0.1964
水分利用效率 Succeeding crop water-use efficiency	84	<0.03	599	0.5819

值与绿肥翻压至后茬粮食作物播种间隔时间相关性不显著。

绿肥种植对 PSE 和 SWSP 的影响与 MAP 和 MAT 不相关 (数据略), 但与休闲期降水存在显著的

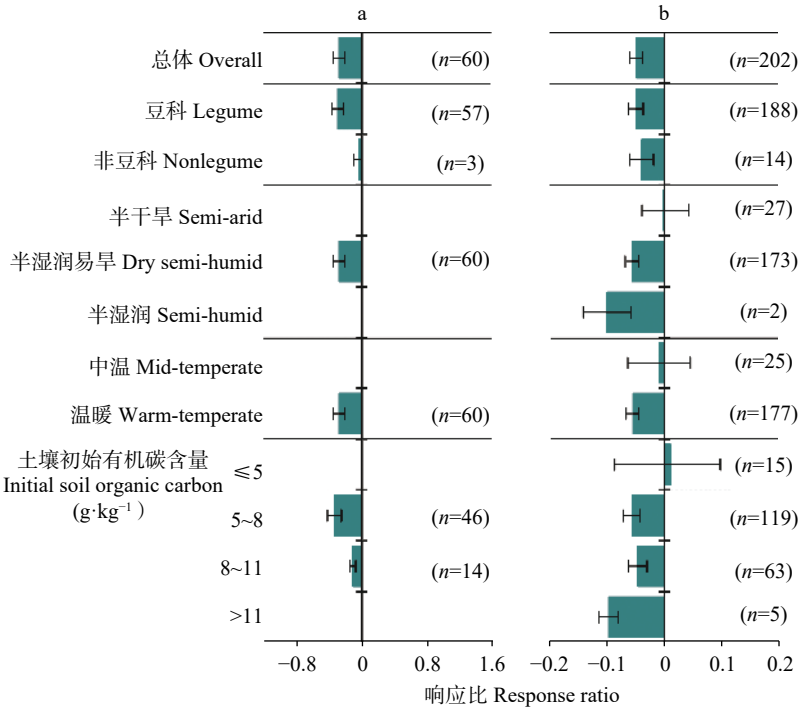

图 2 绿肥种植对休闲期降水储存效率 (a) 和后茬粮食作物播种时土壤储水量 (b) 的影响

Fig. 2 Response ratios of planting green manure compared to no green manure on precipitation storage efficiency during the fallow period (a) and soil water storage at succeeding crop planting (b)

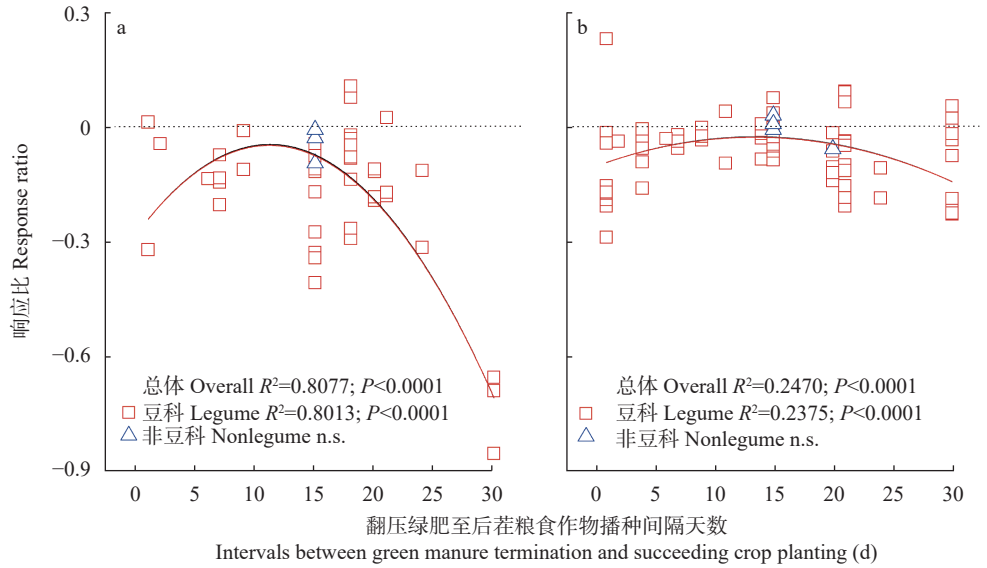

图 3 休闲期降水储存效率 (a) 和后茬粮食作物播种时土壤贮水量 (b) 的响应比与翻压绿肥至后茬粮食作物播种间隔天数的关系

Fig. 3 Relationship between the response ratios of green manure compared to no green manure on precipitation storage efficiency during the fallow period (a) and soil water storage at succeeding crop planting (b) and the interval between green manure termination and planting of succeeding crop

二项式相关性 (图 4)。随休闲期降水量增加, PSE 的 RR 值呈先增加后减少趋势 (y=−4E−07x^2+0.0009x−0.3946) (图 4a), 而 SWSP 的 RR 值呈先减少后增加趋势 (y=2E−06x^2−0.0011x+0.1184)(图 4b), 其 RR 值在休闲期降水量 320 mm 附近时最小。两个指标 RR 值的 22% 和 5% 变异性可以由休闲期降水加以解释。种植豆科绿肥与总体变化基本一致, 而受数据量限制, 非豆科绿肥 PSE 和 SWSP 的 RR 值与休闲期降水量间相关性不显著。

2.2 后茬粮食作物产量

后茬粮食作物产量的试验数据为 368 组, 呈正态分布 (P<0.05), 数据异质性较高且无发表偏倚 (表 1、

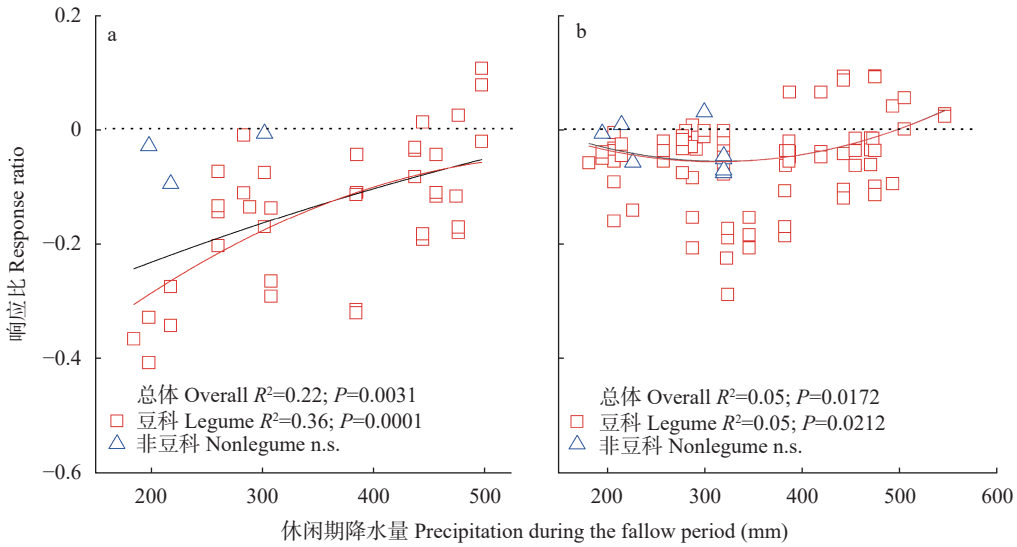

图 4　休闲期降水储存效率 (a) 和后茬粮食作物播种时土壤贮水量 (b) 的响应比与休闲期降水量的关系

Fig. 4　Relationship between the response ratio of green manure compared to no green manure on precipitation storage efficiency during the fallow period (a), soil water storage at succeeding crop planting (b) and precipitation during the fallow period

表 2), 能够满足整合分析要求。

与裸地休闲相比, 绿肥种植导致后茬粮食作物产量平均增加 2.37% (P<0.05), 其中豆科绿肥增产 3.48% (P<0.05); 而非豆科绿肥导致后茬粮食作物产量下降 8.69% (P<0.05) (图 5a)。在半干旱和半湿润易旱地区, 绿肥种植对后茬粮食作物产量分别提高 15.05% 和 2.37% (P<0.05), 而在半湿润地区产量下降 6.88% (P<0.05)。绿肥种植在中温区显著提高了后茬粮食作物产量, 但在温暖地区产量效应不显著。当土壤 SOC_i<5 g·kg^{-1} 时, 绿肥种植显著增加了后茬粮食作物产量, 但随着 SOC_i 的增加, 其对后茬粮食作物产量的影响不再显著。

随绿肥翻压至后茬粮食作物播种间隔时间延长, 后茬粮食作物产量 RR 值总体上呈先增加后减少变化 (y=−0.0007x^2+0.0177x−0.0355), 并在间隔时间 13 d 左右时达最大 (图 6a)。绿肥翻压至后茬粮食作物播种时间间隔能够解释 19% 的产量变异。豆科绿肥与翻压至后茬粮食作物播种间隔时间之间的相关关系与总体一致, 而后茬粮食作物产量的 RR 随间隔时间的延长并未发生显著变化。尽管绿肥填闲种植产量

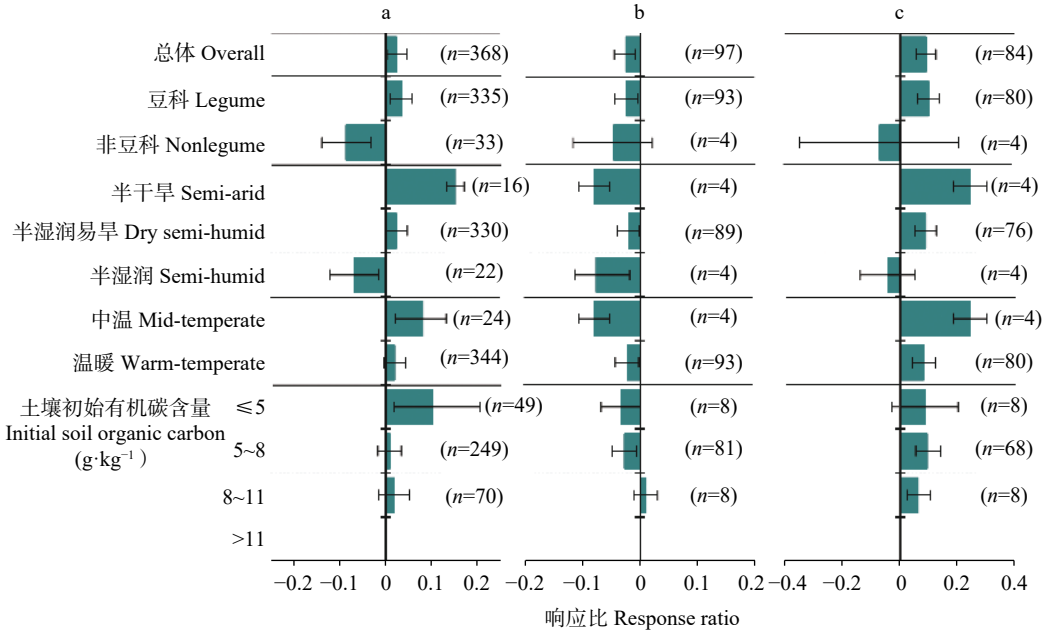

图 5　绿肥种植对后茬粮食作物产量 (a)、蒸散量 (b) 和水分利用效率 (c) 的影响

Fig. 5　Response ratio of planting green manure compared to no green manure on succeeding crop yield (a), evapotranspiration (b), and water-use efficiency (c)

效应总体上与总体绿肥生物量相关性不显著, 绿肥种类间存在差异 (图 6b)。随着绿肥生物量的增加, 后茬粮食作物产量在种植豆科绿肥时呈现先增加后减少的趋势, 并在绿肥生物量为 2200 kg·hm^{-2} 左右时达最大; 而在种植非豆科绿肥时, 后茬粮食作物产量呈先减少后增加的趋势, 最低值出现在非豆科绿肥生物量为 1400 kg·hm^{-2} 左右。

2.3 蒸散量和水分利用效率

后茬粮食作物 ET 和 WUE 的试验数据分别为 97 和 84 组, 均呈正态分布 (P<0.05), 数据异质性较高且无发表偏倚 (表 1、表 2), 能够满足整合分析要求。

与裸地休闲相比, 绿肥种植 ET 总体上降低了 2.51% (P<0.05), 其中种植豆科绿肥降低了 ET, 而种植非豆科绿肥对 ET 没有影响 (图 5b)。绿肥种植对后茬粮食作物 ET 的负面影响在半干旱地区显著大于半湿润易旱区, 在中温区显著大于温暖区。土壤 SOC_i<8 g·kg^{-1} 时, 绿肥种植较裸地休闲降低了 ET (P<0.05), 但当 SOC_i 在 8~11 g·kg^{-1} 时, 绿肥对 ET 的影响不显著。后茬粮食作物 ET 的 RR 值随总体绿肥生物量增加并没有显著变化 (图 7a), 且与 MAP、MAT 间无显著相关关系 (数据略)。

与裸地休闲相比, 绿肥种植对后茬粮食作物 WUE 总体上提高 8.97% (P<0.05), 其中豆科绿肥导致后茬粮食作物 WUE 提高 9.81%, 而非豆科绿肥仅有

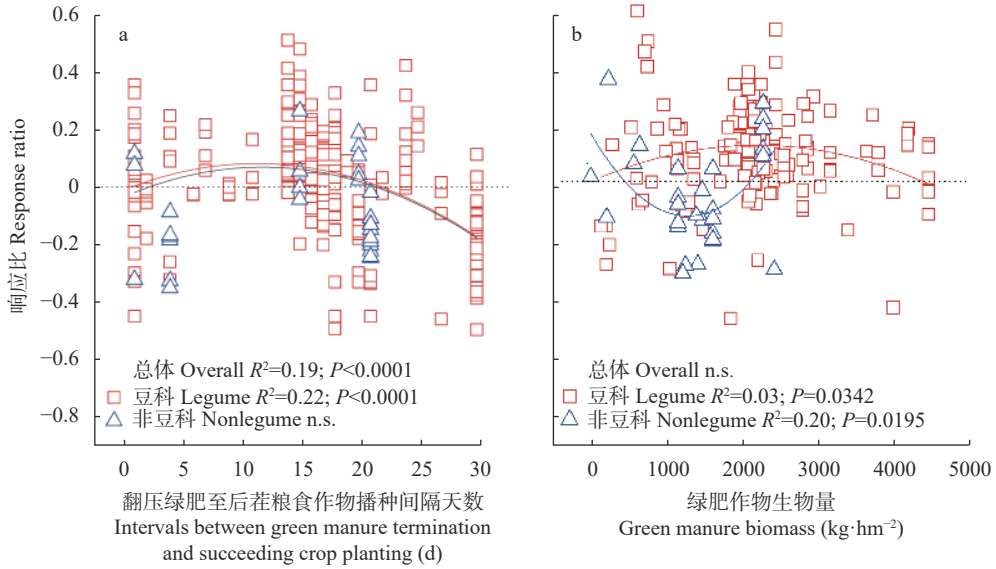

图 6 后茬粮食作物产量的响应比与翻压绿肥至后茬粮食作物播种间隔天数 (a) 和绿肥作物生物量 (b) 的关系

Fig. 6 Relationships between the response ratio of green manure compared to no green manure on succeeding crop yield and the interval between green manure termination and planting of succeeding crop (a), and green manure biomass (b)

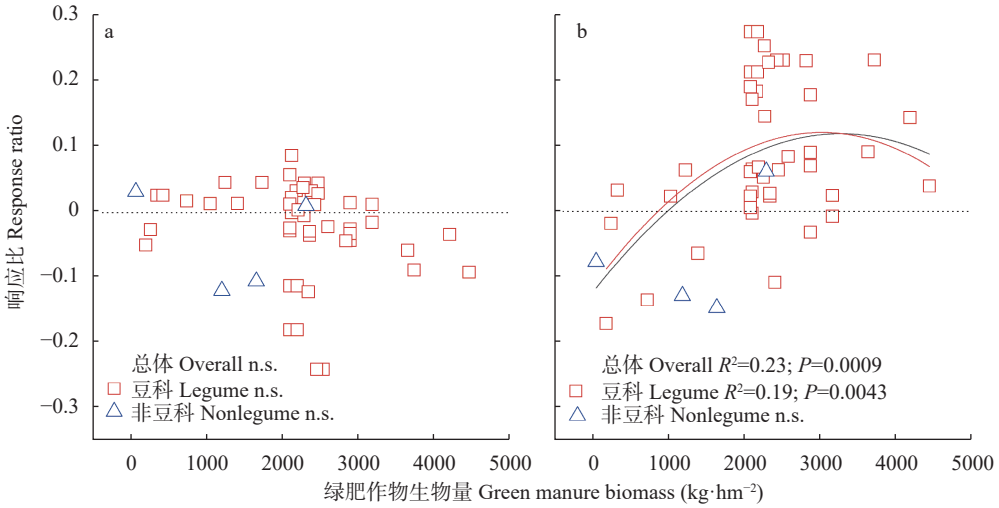

图 7 蒸散量 (a) 和水分利用效率 (b) 的效应量与绿肥作物生物量的关系

Fig. 7 Relationships between the response ratio of green manure compared to no green manure on succeeding crop evapotranspiration (a) and water-use efficiency (b) and green manure biomass

4 组数据, 对 WUE 具有负效应但不显著(图 5c)。绿肥种植对后茬粮食作物 WUE 的影响在半干旱和半湿润易旱区具有显著正效应, 且在半干旱区显著大于半湿润易旱区, 但在半湿润区没有显著影响。绿肥种植对后茬粮食作物 WUE 的正效应在中温区显著大于温暖区。土壤 SOC_i 在 5~11 $g \cdot kg^{-1}$时, 绿肥种植较裸地休闲显著提高了后茬粮食作物 WUE, 但当 SOC_i<5 $g \cdot kg^{-1}$ 时, 影响不显著。随绿肥生物量的增加, 后茬粮食作物 WUE 的 RR 值呈二项式变化, 绿肥生物量可以解释 23% 的 WUE 变异 (图 7B)。豆科绿肥对 WUE 的影响与总体一致, 但非豆科绿肥受数据量的影响, 与其生物量的关系不显著。

3　讨论

3.1　绿肥种植对土壤水分的影响

与传统的裸地休闲方式相比, 休闲期种植绿肥作物会引起其对土壤水分的竞争性利用, 而休闲期土壤储水量的变化本质上是绿肥作物生长耗水和遮荫抑蒸相互权衡的结果[63]。本文采用整合分析得出, 绿肥种植对 PSE 和 SWSP 总体上具有显著负效应, 表明绿肥作物的耗水效果显著大于其遮荫保水效应。但有研究表明, 相比于裸地休闲, 绿肥种植可以通过增加土壤有机质[7], 提高土壤孔隙度[8]、导水率[4] 和团聚作用[8, 14] 来增强土壤保水持水能力, 但这种保水效果可能只体现在表层土壤, 且需要较长的种植年限才能得以实现[2]。本文收集的相关试验数据中土壤储水量计算深度均超过了 200 cm, 表层保水效果未能得到充分体现。

绿肥生物量大小可以通过改变作物遮荫能力和蒸腾过程来影响 PSE 和 SWSP。绿肥作物生物量的积累通常以消耗土壤水分作为代价, 但也增强其“遮荫效应”[1, 6] 来减少土壤蒸发失水。从理论上分析, 应该存在一个绿肥生物量阈值, 其对土壤水分的负面影响可以达到最低。但并未发现 PSE 和 SWSP 与绿肥生物量间的定量关系, 表明绿肥翻压至后茬粮食作物播种间隔期间降水量对后茬粮食播种时的土壤水分储存具有重要影响。但由于数据限制, 本文未收集到间隔期间的降水数据。随休闲期降水量 (包括绿肥作物生长期间后翻压至粮食作物播种期间的降水), 超过 320 mm 后降水量的进一步增加可以有效提高 SWSP, 表明足够的休闲期降水补充能显著降低绿肥种植对土壤水分造成的负面影响。Alvarez 等[64] 在阿根廷潘帕斯地区的研究也发现, 除极干旱的年份外, 绿肥种植不会影响后茬作物的土壤水分供应。

翻压绿肥至后茬粮食作物播种间隔时间同样影响着 PSE 和 SWSP。虽然提前翻压绿肥会降低其生物量的积累, 但加大间隔时间可以增加降水补充土壤水分的可能性, 进而有效缓解绿肥种植对土壤水分的负面影响。本文发现, 绿肥翻压至后茬粮食作物播种的间隔时间维持在 13 d 左右, 绿肥种植对 PSE 和 SWSP 的负面影响最小 (图 3 a, 3b)。Daigh 等[65] 在美国爱荷华州和印第安纳州的研究也表明, 间隔时间在 14 d 左右有利于增加 SWSP, 与本研究结果一致。而 Clark 等[66] 在美国马里兰州研究发现, 间隔时间延长至 4 周左右时, 绿肥种植较裸地休闲显著降低 SWSP。

绿肥种植的水分效应在不同气候和土壤条件下也存在较大变异。半干旱地区有限的降水限制绿肥生物量的积累, 但较少的生物量降低了蒸腾失水, 导致绿肥种植对 SWSP 的影响不显著 (图 2b)。而在湿润地区, 更多的降水加速了绿肥作物生长, 进而导致土壤水分的过度消耗, 影响生物量可能过度积累, 增加水分消耗, 进而影响到后茬粮食作物播种时的土壤水分储存。土壤初始肥力较好时, 更多的有机碳含量有利于不同微生物群生长和分泌物的释放, 促进土壤团聚作用[67], 进而提高土壤持水性能。研究表明, 绿肥种植提供了额外的有机物输入, 能够显著改善土壤水分相关的物理指标 (增加土壤孔隙度、提高土壤容重、增加土壤团聚体稳定性等), 促进水分入渗[8, 14], 然而这种保水作用可能需要更长的种植年限才能得以实现。受数据限制, 本文未能发现绿肥种植水分效应与种植年限之间的关系。

3.2　绿肥种植对后茬粮食作物产量的影响

本文结果显示, 绿肥种植较裸地休闲总体上显著提高了后茬粮食作物产量 (图 5a), 这与 Lee 等[68] 在地中海地区的整合分析结果一致。Fontana 等[69] 在阿根廷潘帕斯地区的长期试验研究发现, 虽然绿肥种植显著降低了土壤水分, 但其同时可以有效改善土壤质量, 并未导致后茬大豆 (*Glycine max*) 出现产量下降。本文主要集中在我国黄土高原地区, 绿肥种植的增产效应可能与绿肥翻压后的培肥作用有关。绿肥翻压后可以增加养分还田量, 改善土壤养分状况, 增加土壤有机质, 特别是豆科绿肥还可以通过生物固氮进一步提高土壤肥力[70-72]; 另一方面绿肥翻压后土壤物理性状得到有效改善, 促进土壤团粒结构的形成, 更利于后茬作物根系生长发育, 从而促进后茬作物对土壤养分的吸收[1, 11-12]。国内外大量研究也表明[10, 14, 73-75], 休闲期引种绿肥作物能够显著提

高土壤肥力, 进而维持或提高后茬粮食作物产量。绿肥种植的产量效应与绿肥翻压至后茬粮食作物播种间隔时间有关。豆科绿肥翻压至后茬粮食作物播种间隔时间在 13 d 左右时, 对后茬粮食作物的增产效果最好 (图 6a)。另外也有研究表明[9, 12, 63], 绿肥生物量也会影响到其产量效应。一般翻压的绿肥生物量越大, 土壤培肥效果越好, 更有利于后茬作物增产, 但绿肥生物量的增加会消耗休闲期土壤水分, 反而不利于后茬作物的生产。本文中豆科绿肥作物生物量在 2200 kg·hm^{-2} 附近时, 后茬粮食作物产量效应可以实现最大, 这对于实际生产中合理控制绿肥生物量具有指导意义。

3.3 绿肥种植对后茬粮食作物水分利用的影响

与裸地休闲相比, 豆科绿肥种植在增加后茬粮食作物产量的同时降低 ET, 从而提高 WUE (图 5b、5c)。这与 Currie 等[76] 在美国堪萨斯州和 Frasier 等[77] 在阿根廷拉潘帕地区的报道相一致。而非豆科绿肥种植较裸地休闲对 ET 没有影响 (图 5b), 这可能是有限的试验数据 (n=4) 导致的不确定结果。SWSP 的减少导致 ET 降低, 从而提高 WUE。例如在土壤 SOC_i 5~8 g·kg^{-1} 地区, 绿肥种植相比于裸地休闲可维持后茬粮食作物产量, 但会降低 SWSP 和 ET, 从而有效提高 WUE。已有研究表明[7-8, 78], 绿肥翻压后土壤有机碳含量的增加会降低 ET。然而本文中, 在 SOC_i 8~11 g·kg^{-1} 分组, 绿肥种植较裸地休闲对 ET 并没有影响, 可能是其他因素抵消了高 SOC_i 的影响。本研究中未发现绿肥生物量及降水量 (数据略) 与 ET 的定量关系, 这有待进一步试验验证。相比之下, 绿肥种植系统后茬粮食作物减产可能会降低 WUE, 这与 Nielsen 等[79] 在美国科罗拉多州的田间试验研究结果一致。本文中当豆科绿肥生物量>1200 kg·hm^{-2} 时, 后茬粮食作物 WUE 有显著提高, 表明维持豆科绿肥生物量在这个水平上, 能够有效促进后茬粮食作物水分利用。

3.4 不足之处

本文发现绿肥种植可以减少休闲期的土壤水分, 但将绿肥翻压入土能够总体上提高后茬粮食作物产量和 WUE。这与大多数田间试验结果一致。但也有部分报道显示, 绿肥种植并没有显著增加后茬粮食作物产量和水分利用, 甚至出现减产现象。受绿肥翻压至后茬粮食作物播种间隔期间降水数据的限制, 本研究采用了整个休闲期降水数据进行了分析, 仅能在一定程度反映休闲期降水对绿肥种植水分效应的影响。此外, 目前黄土高原地区种植的绿肥多为豆科绿肥, 涉及非豆科绿肥数据较少, 这对客观评价非豆科绿肥的水分和产量效应会产生一定偏差。而国外研究表明, 非豆科绿肥可能具有更大的固碳潜力以及土壤质量改善效果[64, 71, 74], 今后本地区生产实践中应对非豆科绿肥开展更多的研究。

4 结论

基于 46 篇黄土高原绿肥相关文献数据进行整合分析研究, 发现与传统的裸地休闲方式相比, 休闲期种植绿肥作物虽然对土壤水分储存具有显著负效应, 但总体上能够显著促进后茬粮食作物产量形成和水分利用。绿肥种植的水分和产量效应与绿肥翻压至后茬粮食作物播种时间间隔、绿肥生物量以及土壤和气候条件均显著相关, 在后茬粮食作物播前 13 d 左右时翻压豆科绿肥、控制豆科绿肥生物量在 2200~3100 kg·hm^{-2}, 能够有效提高黄土高原旱作农田绿肥填闲种植系统水分生产可持续性。

参考文献 References

[1] 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[J]. 生态学报, 2018, 38(14): 5244−5254
WANG J, BO J J, FU X. Research progress in cover cropping and its feasibility in the dryland farming systems on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(14): 5244−5254

[2] DARYANTO S, FU B J, WANG L X, et al. Quantitative synthesis on the ecosystem services of cover crops[J]. Earth-Science Reviews, 2018, 185: 357−373

[3] FINNEY D M, KAYE J P. Functional diversity in cover crop polycultures increases multifunctionality of an agricultural system[J]. Journal of Applied Ecology, 2017, 54(2): 509−517

[4] 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

[5] SHARMA V, IRMAK S. Soil-water dynamics, evapotranspiration, and crop coefficients of cover-crop mixtures in seed maize cover-crop rotation fields. Ⅱ: grass-reference and alfalfa-reference single (normal) and basal crop coefficients[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2017, 143(9): 04017033

[6] DELPUECH X, METAY A. Adapting cover crop soil coverage to soil depth to limit competition for water in a Mediterranean vineyard[J]. European Journal of Agronomy, 2018, 97: 60−69

[7] POEPLAU C, DON A. Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops — A meta-analysis[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2015, 200: 33−41

[8] VILLAMIL M B, BOLLERO G A, DARMODY R G, et al. No-till corn/soybean systems including winter cover crops[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(6): 1936−1944

[9] BARKER J B, HEEREN D M, KOEHLER-COLE K, et al. Cover crops have negligible impact on soil water in Nebraska maize-soybean rotation[J]. Agronomy Journal, 2018, 110(5): 1718−1730

[10] 李小涵, 王朝辉, 郝明德, 等. 黄土高原旱地种植体系对土壤水分及有机氮和矿质氮的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(9): 2686−2692
LI X H, WANG Z H, HAO M D, et al. Effects of cropping systems on soil water, organic N and mineral N in dryland soil on the Loess Plateau[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(9): 2686−2692

[11] 李婧, 张达斌, 王峥, 等. 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[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(3): 136−142
LI J, ZHANG D B, WANG Z, et al. Effect of fertilizer and green manure incorporation methods on the growth and water use efficiency of winter wheat[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(3): 136−142

[12] 张祺, 王俊. 填闲种植和施氮量对旱作冬小麦农田土壤水分及作物产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(6): 120−124
ZHANG Q, WANG J. Effects of cover crop and N fertilization on soil moisture and crop yield in a dryland winter wheat field[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(6): 120−124

[13] 张树兰, Lars Lovdahl, 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[J]. 农业工程学报, 2005, 21(4): 20−24
ZHANG S L, LOVDAHL L, TONG Y A. Effects of different field management practices on winter wheat yield and water utilization efficiency in Weibei Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(4): 20−24

[14] SAINJU U M, WHITEHEAD W F, SINGH B P. Cover crops and nitrogen fertilization effects on soil aggregation and carbon and nitrogen pools[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2003, 83(2): 155−165

[15] AMMAR A R M, CHEN Y P, ZHANG T, et al. Cover crops cultivated in summer fallow under varying spatial arrangements improved soil properties of dryland Loess Plateau of China[J]. Pakistan Journal of Agricultural Sciences, 2020, 57(3): 921−931

[16] 吕汉强, 于爱忠, 柴强. 绿洲灌区玉米产量及水分利用对绿肥还田方式的响应[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(5): 671−679
LYU H Q, YU A Z, CHAI Q. Response of maize yield and water use to different green manure utilization patterns in arid oasis irrigation area[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(5): 671−679

[17] AO Z Y, XU Q, CHEN Y P, et al. Enhanced stabilization of soil organic carbon by growing leguminous green manure on the Loess Plateau of China[J]. Soil Science Society of America Journal, 2019, 83(6): 1722−1732

[18] 姚致远. 旱地豆科绿肥提升土壤碳氮储量及降低环境代价的潜力与机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019
YAO Z Y. Potential and mechanisms of dryland leguminous green manure for improving soil carbon/nitrogen stocks and reducing environmental costs[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2019

[19] 李志鹏, 王俊, 商雨晴, 等. 填闲作物腐解过程及其对后茬冬小麦产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(4): 75−82, 90
LI Z P, WANG J, SHANG Y Q, et al. Decomposition of cover crop residues in soils and its effects on winter wheat yield[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(4): 75−82, 90

[20] 刘苡轩, 黄冬琳, 刘娜, 等. 渭北旱塬豆科绿肥提高冬小麦籽粒锌的效应与影响因素研究[J]. 中国农业科学, 2018, 51(21): 4030−4039
LIU Y X, HUANG D L, LIU N, et al. The increasing effect and influencing factors of leguminous green manure on wheat grain Zn in Weibei highland[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(21): 4030−4039

[21] 薛乃雯. 旱地麦田夏闲期覆盖及绿肥种植对土壤水分、养分及后作冬小麦生长的影响[D]. 太谷: 山西农业大学, 2018
XUE N W. Effect of mulching and green manures during summer fallow on soil water, nutrition and growth of winter wheat[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2018

[22] 付双军. 种植绿肥植物对黄土高原干旱区休耕地土壤肥力的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018
FU S J. Effects of planting green manure plants on soil fertility in fallow land in arid areas of the loess plateau[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2018

[23] 张祺. 填闲种植对冬小麦田夏闲期土壤水分、温室气体排放及碳氮收支的影响[D]. 西安: 西北大学, 2018
ZHANG Q. Effects of cover crop-winter wheat system on soil water, greenhouse gas emission and carbon and nitrogen budget[D]. Xi'an: Northwest University, 2018

[24] 王煊. 旱地不同绿肥和施磷量对土壤肥力、冬小麦生长及磷肥减量效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018
WANG X. Effects of different green manure and phosphate fertilizer application on soil fertility, winter wheat growth and fertilizer reduction[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2018

[25] 张滕. 旱地种植不同绿肥和氮磷肥用量对土壤肥力和冬小麦生长影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018
ZHANG T. Effects of different green manure, nitrogen and phosphorus fertilizer on soil fertility and winter wheat growth in dryland[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2018

[26] YAO Z Y, WANG Z, LI J, et al. Screen for sustainable cropping systems in the rain-fed area on the Loess Plateau of China[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 176: 26−35

[27] YAO Z Y, ZHANG D B, YAO P W, et al. Coupling life-cycle assessment and the RothC model to estimate the carbon footprint of green manure-based wheat production in China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 607/608: 433−442

[28] HE G, WANG Z H, LI F C, et al. Soil nitrate-N residue, loss and accumulation affected by soil surface management and precipitation in a winter wheat-summer fallow system on dryland[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2016, 106(1): 31−46

[29] ZHANG D B, YAO P W, NA Z, et al. Soil water balance and water use efficiency of dryland wheat in different precipitation years in response to green manure approach[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 26856

[30] 姚致远, 王峥, 李婧, 等. 旱地基于豆类绿肥不同轮作方式

的经济效益分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 76−84
YAO Z Y, WANG Z, LI J, et al. Profit analysis of different rotations based on leguminous green manure in dryland area[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(1): 76−84

[31] 姚致远, 王峥, 李婧, 等. 轮作及绿肥不同利用方式对作物产量和土壤肥力的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(8): 2329−2336
YAO Z Y, WANG Z, LI J, et al. Effects of rotations and different green manure utilizations on crop yield and soil fertility[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(8): 2329−2336

[32] 胡铁成, 李红燕, 曹群虎, 等. 旱地不同绿肥品种及种植密度的肥饲效应研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2015, 43(4): 44−52
HU T C, LI H Y, CAO Q H, et al. Effects of green manure variety and growth density on forage value and soil fertility in dry land[J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2015, 43(4): 44−52

[33] 李富翠. 旱地夏闲期覆盖秸秆和种植绿肥协调土壤水肥供应的效应与机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015
LI F C. Soil water and nutrient supply affected by straw retention and planting green manure during summer fallow and its mechanism in dryland[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2015

[34] ZHANG D B, YAO P W, ZHAO N, et al. Responses of winter wheat production to green manure and nitrogen fertilizer on the loess plateau[J]. Agronomy Journal, 2015, 107(1): 361−374

[35] YANG N, WANG Z H, GAO Y J, et al. Effects of planting soybean in summer fallow on wheat grain yield, total N and Zn in grain and available N and Zn in soil on the Loess Plateau of China[J]. European Journal of Agronomy, 2014, 58: 63−72

[36] 王峥, 梁颖, 姚鹏伟, 等. 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[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(3): 119−126
WANG Z, LIANG Y, YAO P W, et al. Effects of fertilization before sowing of leguminous green manure and its incorporation methods on soil moisture and nutrient regime of wheat field in Weibei Dryland[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(3): 119−126

[37] 苏晨. 不同绿肥与小麦轮作对土壤水肥环境及小麦生长的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014
SU C. Effects of the rotation of different green manures and wheat on soil water-fertility and growth of wheat[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2014

[38] 姚鹏伟, 张达斌, 王峥, 等. 豆科绿肥养分累积规律及其对后茬小麦生长和产量的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2014, 42(3): 111−117
YAO P W, ZHANG D B, WANG Z, et al. Nutrients accumulation of leguminous green manures and the effects on growth and yield of winter wheat[J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2014, 42(3): 111−117

[39] 张春. 夏闲期种植不同绿肥作物对土壤性状及冬小麦生长的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013
ZHANG C. Effects on soil properties and growth of winter wheat of planting different green manures during summer fallow[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2013

[40] 张达斌, 姚鹏伟, 李婧, 等. 豆科绿肥及施氮量对旱地麦田土壤主要肥力性状的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(7): 2272−2281
ZHANG D B, YAO P W, LI J, et al. Effects of two years' incorporation of leguminous green manure on soil properties of a wheat field in dryland conditions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(7): 2272−2281

[41] 张达斌. 种植豆科绿肥和施氮对渭北旱塬冬小麦产量及土壤性质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012
ZHANG D B. Effects of leguminous green manure and N fertilizer on winter wheat yield and soil properties in Weibei Area[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2012

[42] 杨宁. 豆科绿肥—冬小麦轮作提高小麦产量和营养元素含量的效应与土壤机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012
YANG N. The effect and soil mechanism of improving wheat yield and nutrients content with legume-winter wheat rotations[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2012

[43] 李婧. 渭北旱塬两种轮作制度中绿肥的效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012
LI J. Effects of green manure in two crop rotation systems in Weibei rainfed highland[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2012

[44] 张达斌, 李婧, 姚鹏伟, 等. 夏闲期连续两年种植并翻压豆科绿肥对旱地冬小麦生长和养分吸收的影响[J]. 西北农业学报, 2012, 21(1): 59−65
ZHANG D B, LI J, YAO P W, et al. Effect of two years incorporation of leguminous green manure during summer fallow period on winter wheat growth and nutrients uptake in dryland[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2012, 21(1): 59−65

[45] 李富翠, 赵护兵, 王朝辉, 等. 旱地夏闲期秸秆覆盖和种植绿肥对冬小麦水分利用及养分吸收的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(1): 119−125
LI F C, ZHAO H B, WANG Z H, et al. Effects of straw mulching and planting green manure on water use and nutrients uptake of winter wheat on dryland[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(1): 119−125

[46] 李可懿. 黄土高原旱地与豆科绿肥轮作和施氮对小麦产量及籽粒矿质养分的影响及其土壤学机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011
LI K Y. Effects of rotation with legume and nitrogen application on yield and mineral nutrition of wheat grain and its soil mechanism on dryland of the Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2011

[47] 李富翠. 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生长的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011
LI F C. Effects of straw returning and planting green manure during summer fallow on soil water, nutrient and winter wheat growth on dryland of Weibei Plain[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2011

[48] 李可懿, 王朝辉, 赵护兵, 等. 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[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(2): 110−116, 123

LI K Y, WANG Z H, ZHAO H B, et al. Effect of rotation with legumes and N fertilization on yield and grain nutrient contents of wheat in dryland of the Loess Plateau[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(2): 110−116, 123

[49] 李富翠, 赵护兵, 王朝辉, 等. 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[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9): 1861−1871
LI F C, ZHAO H B, WANG Z H, et al. Effects of straw mulching and planting green manure on soil water, nutrient and winter wheat yield on Weibei Plateau, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(9): 1861−1871

[50] 赵娜. 夏闲期种植豆科绿肥对旱地土壤性质和冬小麦生长的影响及其机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010
ZHAO N. Effect of leguminous green manure in summer on soil properties and winter wheat growth in dryland and its mechanism[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2010

[51] 赵娜, 赵护兵, 鱼昌为, 等. 夏闲期种植翻压绿肥和施氮量对冬小麦生长的影响[J]. 西北农业学报, 2010, 19(12): 41−47
ZHAO N, ZHAO H B, YU C W, et al. Effect of green manure in summer fallow period and nitrogen rate on winter wheat growth[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2010, 19(12): 41−47

[52] ZHANG S L, LÖVDAHL L, GRIP H, et al. Effects of mulching and catch cropping on soil temperature, soil moisture and wheat yield on the Loess Plateau of China[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 102(1): 78−86

[53] 陈乃政, 曲继宗, 史观义. 晋西山地麦田夏闲期复种绿肥保土增产试验研究[J]. 土壤肥料, 1989, (2): 20−23
CHEN N Z, QU J Z, SHI G Y. A study of soil conservation and yield increase in wheat fields planted to green manure crops in summer in the mountain areas in the west part of Shanxi[J]. Soils and Fertilizers, 1989, (2): 20−23

[54] 曾光秀. 绿肥化肥配合施用的供肥状况及其产量效应[J]. 青海农林科技, 1989, (1): 24−28
ZENG G X. Effects of green manure and chemical fertilizer dressing on fertilizer supply and crop yield[J]. Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry, 1989, (1): 24−28

[55] 陈乃政, 曲继宗. 晋西山地麦田夏季复播绿肥土壤水分利用的研究[J]. 干旱地区农业研究, 1985, 3(3): 27−36
CHEN N Z, QU J Z. A study of soil moisture in wheat fields planted to green manure crops in summer in the mountain areas in the west part of Shanxi[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1985, 3(3): 27−36

[56] 侯仕熙, 王立志. 旱地绿肥腐解与耗水试验[J]. 山西农业科学, 1981, 9(6): 16−17
HOU S X, WANG L Z. A study of decomposing characteristics of green manure and soil water consumption in dryland[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 1981, 9(6): 16−17

[57] 陈奇恩, 冯永平. 旱地种植绿肥对土壤水分的影响[J]. 土壤肥料, 1980, (3): 51−54
CHEN Q E, FENG Y P. Effects of planting green manure on soil water in dryland[J]. Soils and Fertilizers, 1980, (3): 51−54

[58] 陕西黄陵县农业技术推广站. 麦田套种草木樨压绿肥对后作小麦肥效的试验[J]. 中国农业科学, 1965, (4): 55−56
Huangling Agricultural Technology Extension Station of Shaanxi Province. A study of inter-planting sweet clover and wheat on succeeding wheat fertilizer efficiency[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1965, (4): 55−56

[59] 银敏华, 李援农, 陈朋朋, 等. 基于Meta-analysis的中国北方地区免耕玉米产量效应研究[J]. 中国农业科学, 2018, 51(5): 843−857
YIN M H, LI Y N, CHEN P P, et al. Effect of no-tillage on maize yield in northern region of China — A Meta-analysis[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(5): 843−857

[60] HEDGES L V, GUREVITCH J, CURTIS P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology[J]. Ecology, 1999, 80(4): 1150−1156

[61] MUHAMMAD I, WANG J, SAINJU U M, et al. Cover cropping enhances soil microbial biomass and affects microbial community structure: a meta-analysis[J]. Geoderma, 2021, 381: 114696

[62] WANG N J, DING D Y, MALONE R W, et al. When does plastic-film mulching yield more for dryland maize in the Loess Plateau of China? A meta-analysis[J]. Agricultural Water Management, 2020, 240: 106290

[63] MITCHELL J P, SHRESTHA A, IRMAK S. Trade-offs between winter cover crop production and soil water depletion in the San Joaquin Valley, California[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 70(6): 430−440

[64] ALVAREZ R, STEINBACH H S, DE PAEPE J L. Cover crop effects on soils and subsequent crops in the pampas: a meta-analysis[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 170: 53−65

[65] DAIGH A L, HELMERS M J, KLADIVKO E, et al. Soil water during the drought of 2012 as affected by rye cover crops in fields in Iowa and Indiana[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 69(6): 564−573

[66] CLARK A J, DECKER A M, MEISINGER J J, et al. Kill date of vetch, rye, and a vetch-rye mixture: Ⅱ. soil moisture and corn yield[J]. Agronomy Journal, 1997, 89(3): 434−441

[67] 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

[68] LEE H, LAUTENBACH S, NIETO A P G, et al. The impact of conservation farming practices on Mediterranean agro-ecosystem services provisioning — a meta-analysis[J]. Regional Environmental Change, 2019, 19(8): 2187−2202

[69] FONTANA M B, NOVELLI L E, STERREN M A, et al. Long-term fertilizer application and cover crops improve soil quality and soybean yield in the Northeastern Pampas region of *Argentina*[J]. Geoderma, 2021, 385: 114902

[70] 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

[71] GABRIEL J L, QUEMADA M. Replacing bare fallow with cover crops in a maize cropping system: Yield, N uptake and fertiliser fate[J]. European Journal of Agronomy, 2011, 34(3): 133−143

[72] LYON D J, NIELSEN D C, FELTER D G, et al. Choice of

summer fallow replacement crops impacts subsequent winter wheat[J]. Agronomy Journal, 2007, 99(2): 578−584

[73] KRAMBERGER B, GSELMAN A, JANZEKOVIC M, et al. Effects of cover crops on soil mineral nitrogen and on the yield and nitrogen content of maize[J]. European Journal of Agronomy, 2009, 31(2): 103−109

[74] BOSELLI R, FIORINI A, SANTELLI S, et al. Cover crops during transition to no-till maintain yield and enhance soil fertility in intensive agro-ecosystems[J]. Field Crops Research, 2020, 255: 107871

[75] POTT L P, AMADO T J C, SCHWALBERT R A, et al. Effect of hairy vetch cover crop on maize nitrogen supply and productivity at varying yield environments in Southern Brazil[J]. Science of the Total Environment, 2021, 759: 144313

[76] CURRIE R S, KLOCKE N L. Impact of a terminated wheat cover crop in irrigated corn on atrazine rates and water use efficiency[J]. Weed Science, 2005, 53(5): 709−716

[77] FRASIER I, NOELLEMEYER E, AMIOTTI N, et al. Vetch-rye biculture is a sustainable alternative for enhanced nitrogen availability and low leaching losses in a no-till cover crop system[J]. Field Crops Research, 2017, 214: 104−112

[78] OLNESS A, ARCHER D. Effect of organic carbon on available water in soil[J]. Soil Science, 2005, 170(2): 90−101

[79] NIELSEN D C, VIGIL M F. Searching for synergism in dryland cropping systems in the central Great Plains[J]. Field Crops Research, 2014, 158: 34−42