

## 不同秸秆还田对冬闲期农田杂草多样性的影响

桂浩然, 王建, 董雄德, 陈丽, 黄雅祺, 陈志杰, 韩士杰

引用本文:

桂浩然, 王建, 董雄德, 陈丽, 黄雅祺, 陈志杰, 韩士杰. 不同秸秆还田对冬闲期农田杂草多样性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(4): 746–754.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1197>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 不同秸秆还田方式对土壤线虫群落特征的影响

饶继翔, 陈昊, 吴兴国, 胡森琦, 孙庆业

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2473–2480 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0574>

### 转双价基因棉SGK321不同秸秆还田量对土壤线虫群落的影响

李静, 蔡连贺, 刘瑞华, 凤春, 李刚, 杨殿林, 赵建宁

农业环境科学学报. 2019, 38(4): 871–881 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1034>

### 秸秆还田对黑土农田土壤甲螨群落结构的影响

连旭, 隋玉柱, 武海涛, 刘冬, 郝敏, 管强

农业环境科学学报. 2017, 36(1): 134–142 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0911>

### 玉米秸秆添加畜禽粪便田间条带堆腐对黑土活性有机碳的影响

李虎, 吴景贵, 李建明

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 1944–1953 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0023>

### 秸秆还田配施石灰对水稻镉吸收累积的影响

杨定清, 李霞, 周娅, 罗丽卉, 谢永红, 王棚, 李旭毅

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1150–1158 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1137>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

桂浩然, 王建, 董雄德, 等. 不同秸秆还田对冬闲期农田杂草多样性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(4): 746–754.

GUI H R, WANG J, DONG X D, et al. Effects of different straw return measures on segetal weed diversity in the winter fallow period[J].

Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(4): 746–754.

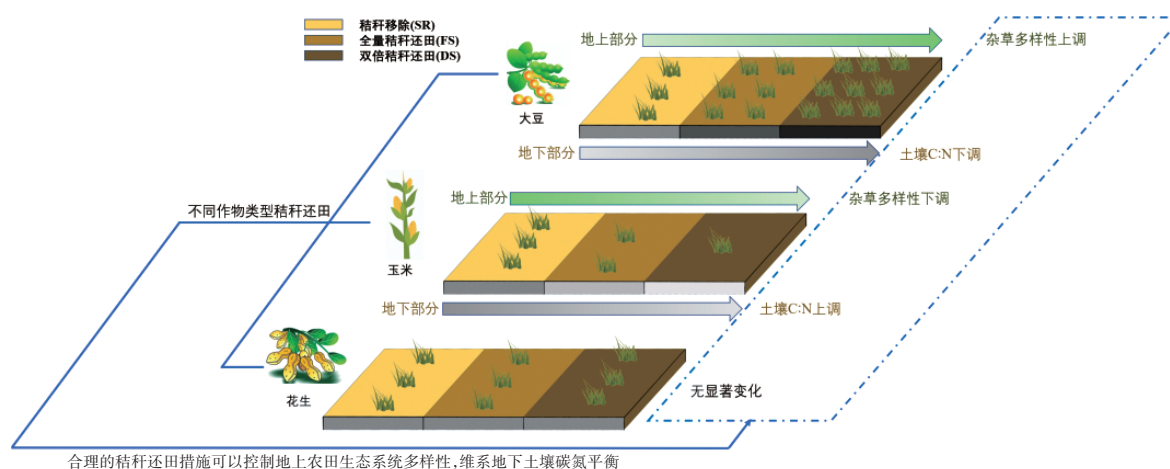


开放科学 OSID

# 不同秸秆还田对冬闲期农田杂草多样性的影响

桂浩然<sup>1,2</sup>, 王建<sup>1,2</sup>, 董雄德<sup>1,2</sup>, 陈丽<sup>1</sup>, 黄雅祺<sup>1</sup>, 陈志杰<sup>1,2</sup>, 韩士杰<sup>1,2\*</sup>

(1. 河南省全球变化生态学国际联合实验室, 河南大学生命科学学院, 河南 开封 475004; 2. 河南省桃花峪黄河滩涂系统野外科学观测研究站, 河南 荥阳 450100)



**摘要:**为研究玉米(*Zea mays*)、花生(*Arachis hypogaea*)和大豆(*Glycine max*)的秸秆还田措施对冬闲期杂草多样性的影响,本文通过杂草物种调查和秸秆移除、秸秆全量还田及双倍秸秆还田控制实验,定量比较玉米、花生、大豆3种作物的田间杂草发生及多样性。研究结果表明:冬闲期间,大豆地田间杂草多样性在秸秆还田处理下显著增加36.0%,而玉米地杂草多样性在双倍秸秆添加时显著下降了71.6%,且二者田间杂草区系的差异随着秸秆添加量的增大而扩大(双倍秸秆还田时二者的Bray-Curtis距离达到0.72),花生地杂草区系对秸秆还田的响应并不显著;不同秸秆还田类型和秸秆还田量对土壤碳氮的影响不同;冬闲期杂草群落多样性变化并不会影响来年生长季杂草的发生。因此,根据不同的作物类型科学地进行秸秆还田处理可控制农田生态系统多样性,平衡土壤碳氮。

**关键词:** 秸秆还田; 冬闲期; 田间杂草; 土壤化学计量比; 聚类分析; 生物多样性

中图分类号: S451; S141.4 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2022)04-0746-09 doi:10.11654/jaes.2021-1197

## Effects of different straw return measures on segetal weed diversity in the winter fallow period

GUI Haoran<sup>1,2</sup>, WANG Jian<sup>1,2</sup>, DONG Xiongde<sup>1,2</sup>, CHEN Li<sup>1</sup>, HUANG Yaqi<sup>1</sup>, CHEN Zhijie<sup>1,2</sup>, HAN Shijie<sup>1,2\*</sup>

(1. International Joint Research Laboratory for Global Change Ecology, School of Life Sciences, Henan University, Kaifeng 475004, China;

2. Taohuayu Yellow River Tidal Flat Systems Observation and Research Station of Henan Province, Xingyang 450100, China)

收稿日期: 2021-10-19 录用日期: 2022-01-06

作者简介: 桂浩然(1998—),男,安徽六安人,硕士研究生,从事农田生态系统多样性保护与环境效应研究。E-mail: ghrris@163.com

\*通信作者: 韩士杰 E-mail: hansj@iae.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41930643)

Project supported: The Key Program of the National Natural Science Foundation of China(41930643)

**Abstract:** To explore the effects of maize (*Zea mays*), peanut (*Arachis hypogaea*), and soybean (*Glycine max*) straw return measures on weed diversity in the winter fallow period, the weed occurrence and diversity in maize, peanut, and soybean were quantitatively compared through a weed species investigation and controlled experiment of straw removal, full straw return, and double straw return. The study produced several important results: the weed diversity in the soybean field was significantly increased by 36.0% under double straw addition, while that in the corn field was significantly decreased by 71.6%. Furthermore, the difference of weed flora between soybean and corn field was amplified with the increase in the amount of straw addition (the Bray-Curtis distance between the two cases was 0.72 under double straw addition). The response of peanut to straw return was not significant. Different straw qualities and quantities had different effects on soil carbon and nitrogen. The change in weed community diversity during the fallow period did not affect the development of weeds in subsequent growing season. Therefore, scientific methods of straw return according to different crop types can control the diversity of the farmland ecosystem.

**Keywords:** straw return; winter fallow period; segetal weed; soil stoichiometric ratio; clustering analysis; biodiversity

田间杂草是农业生产中不可忽视的问题。据报道,我国有杂草1400余种,其中严重危害农业生产的有130余种,在田间杂草防治年投入费用高达235亿元的情况下,作物产量仍因杂草而减少5000万t<sup>[1]</sup>。田间杂草作为农田生态系统的重要组成部分<sup>[2]</sup>,在防治的同时也需兼顾农田生态系统生物多样性的维持,应充分利用杂草,起到平衡土壤碳氮等养分循环的作用。

在20世纪70年代之前,大部分学者的关注点都放在化学除草剂施用,自1970年后,我国化学除草剂施用量大幅提升,近年来化学除草剂施用面积已逾60%<sup>[3]</sup>,随着农药的大量使用以及农药中汞、铜等重金属的难降解问题,一系列生态环境危害风险逐步凸显,甚至在南北极都发生了农药残留事件<sup>[4]</sup>。农药残留会导致土壤退化,进一步导致农田生态系统生物多样性的锐减。农田生物多样性对维持农田生态系统服务功能和农业可持续发展具有重要作用<sup>[5]</sup>,甚至有整合分析提出农业生态系统物种多样性及其组成和生产力同等重要<sup>[6]</sup>。如何权衡农业生态系统物种多样性和其产量一直是农业生产过程中的难题之一,这促使国内外学者的关注点开始转移至生物、生态及其他非化学除草的杂草治理方面。例如,利用冬季深耕翻暴露多年生杂草繁殖体,减少来年杂草发生密度<sup>[7]</sup>;利用杂草种子在淹水条件下不易萌发特性,进行水层管理来控制杂草发生密度<sup>[8]</sup>;控制播种密度及杂草上方作物高度,能影响杂草生物量进而影响作物产量<sup>[9]</sup>。诸如此类的非化学除草防治手段能够在尽可能减少污染防治的同时改变农田生态系统植被群落结构,且不同的防治手段对杂草群落的影响不尽相同。如深耕会消减依靠繁殖体发生的杂草种类;水层管理可改变杂草萌发率,抑制不耐水淹种子的萌发;调整种植密度会影响光合利用效率较差的杂草种类的生长状况。因此,迫切需要思考每一种非化学除草

防治手段下杂草群落的特异性变化及植被区系的分化,从而为杂草治理提供有针对性的、明确可行的方法指导。

秸秆还田作为一种传统的非化学除草防治手段,因秸秆类型多样、还田方式多变而对农田杂草群落多样性有着复杂的影响。同时,农作物秸秆也是我国乃至世界上数量最多的一种农业生产副产品,我国每年农作物秸秆资源量约占世界总量的30%<sup>[10]</sup>,如何发挥秸秆平衡杂草多样性作用和改善田间养分价值是亟需思考的新课题。近年来一些研究发现,秸秆还田可有效补充和平衡土壤养分(碳、氮等)、改良土壤,合理的秸秆管理措施甚至能控制田间杂草的发生和密度,对于优化农田生态环境、促进农作物增产具有重要意义,被认为是高产田建设的基本措施之一<sup>[10]</sup>。黄爱军等<sup>[11]</sup>的研究发现太湖稻-油复种系统中,增加秸秆还田量能够显著提高油菜田春季杂草的总密度,而杂草生物量受秸秆还田时期的影响显著。韩惠芳等<sup>[12]</sup>发现在全量秸秆还田下,不同耕作类型玉米地中杂草总密度显著高于无秸秆还田的对照地。付佑胜等<sup>[13]</sup>的研究发现,随着秸秆覆盖量的减少,杂草(丁香蓼, *Ludwigia prostrata*)的发生比例明显增加。上述研究大多都集中于对作物生长季杂草治理的探索,但随着耕地轮作冬闲制度的不断推广<sup>[14]</sup>,对农田冬闲期土壤养分续存及杂草群落区系的研究将越来越重要。此外,冬闲期因与作物生长季存在时间尺度上的划分,其间杂草群落具有在不影响来年杂草群落的发生和危害的基础上,良性地控制农田生态系统生物多样性的潜力,因此,对冬闲期农田生态系统多样性的探索和控制显得尤为必要。

目前关于田间杂草的控制实验大多都是考虑单一作物种植类型,少有对不同作物种植背景下对杂草群落的比较。NAGY等<sup>[15]</sup>在调查了299种不同类型的

农田后,量化了作物类型、土壤养分参数、海拔等22个解释变量,通过冗余分析(Redundancy analysis, RDA)得出,作物类型对农田杂草群落的影响最为显著,虽然未涉及到冬闲期,但对于了解不同作物背景下的农田生态系统杂草群落区系的发展潜力依然意义重大。黄淮海平原作为我国主要的粮食生产基地,其农田生态系统规模庞大,作物类型多元复杂,作物播种面积占全国23.2%的水平,粮食产量更是达到全国总产量的28.9%<sup>[16]</sup>。因此,开展黄淮海平原主要农作物(大豆、玉米、花生)秸秆还田对冬闲期田间杂草群落及来年作物长势的影响研究,对于深入理解冬闲期杂草发生模式具有重要的科学意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验区概况

研究地点位于开封市水稻乡农场(34°49′13″N, 114°18′18″E)。土壤质地为沙壤土,年均温14.52℃,年均降水量627.5 mm,雨热同期,是典型的暖温带大陆性季风气候。黄淮海平原是我国的第二大平原,是我国粮食的主产区之一,主要农作物有小麦(*Triticum aestivum*)、玉米(*Zea mays*)、花生(*Arachis hypogaea*)、大豆(*Glycine max*)、水稻(*Oryza sativa*)等。其中开封地区主要种植冬小麦、玉米、花生和大豆,其主要耕作方式为玉米、花生和大豆分别与冬小麦轮作,但也存在不与冬小麦轮作的情况,即仅在生长季种植,随后进入冬闲的方式。

### 1.2 实验设计

于2018年进行了样地布置,实验设置了玉米、花生和大豆3种作物,每个作物设置3个处理:双倍秸秆还田(DS)、全量秸秆还田(FS)以及秸秆去除(SR),其中玉米全秸秆量为5 280 kg·hm<sup>-2</sup>,花生全秸秆量为1 800 kg·hm<sup>-2</sup>,大豆全秸秆量为2 850 kg·hm<sup>-2</sup>。每个处理设置3个重复,共设置27个样方,随机区组分布,每个样方大小为10 m×10 m,隔离带宽大于0.5 m,具体样地示意图如图1所示。在2020年4月28日进行3种作物的种植,期间正常管理,正常施肥、除草、除虫。于2020年10月依次进行收获。收获后,在秸秆去除处理组的样方内,将所有秸秆收回;在全量秸秆还田处理的样方内,将秸秆就地粉碎成1~5 cm长段后覆盖于土表,此时土壤不进行翻耕。在双倍秸秆还田处理组的样方内,覆盖两倍于全量秸秆还田处理的粉碎后秸秆。来年播种前对土壤进行翻耕。

### 1.3 杂草物种调查、土壤含水率测定

2021年4月作物播种前对冬闲田杂草进行调查。

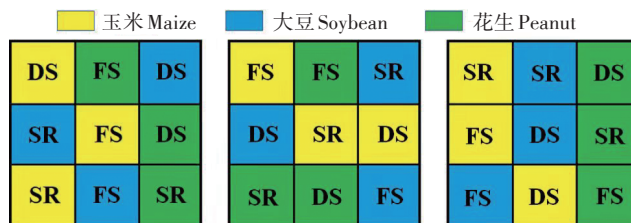


图1 田间样地示意图

Figure 1 Schematic diagram of field plot

首先进行初步调查,在保证调查样方能涵盖整个样方内所有物种的前提下,确定样方调查小面积为1 m×1 m,并用波兰TDR/MUX/mpts水分测定仪对样方内土壤体积含水量进行测定。于9月作物生长季后期用同样的标准进行生长季杂草调查。

### 1.4 土壤取样及处理

2021年4月对各处理样方表层土壤(0~5 cm)进行取样,采用随机取样法对每个处理样方取5钻土,混合为一个全土土样。土样带回实验室即用2 mm筛去除石砾、根系、枯落物,完全风干后研磨过0.15 mm筛,利用半常量元素分析仪(vario EL III, Elementar, Germany)测定土壤总碳和总氮含量。

### 1.5 数据处理

利用Shannon多样性指数( $H'$ )、Shannon均匀度指数( $E$ )、Margalef物种丰富度指数( $D_{MC}$ )3个指标来计算杂草生物多样性<sup>[17]</sup>,其中 $H'$ 能够对田间杂草物种丰富度以及物种均匀度进行综合量度, $E$ 能够衡量田间杂草群落数量分布的均匀程度, $D_{MC}$ 能够衡量特定杂草群落中杂草种类的丰富度。其计算公式为:

$$H' = (N \ln N - \sum n \ln n) N^{-1}$$

$$E = H' / (\ln N)^{-1}$$

$$D_{MC} = (S - 1) / (\ln N)^{-1}$$

式中: $N$ 为各调查样方中1 m×1 m调查面积内所有杂草的总数, $n$ 为各调查样方中1 m×1 m调查面积内某种杂草的数量, $S$ 为各调查样方中1 m×1 m调查面积内杂草种类数量。

使用RGui 4.1.1对不同秸秆还田处理及不同作物种类下的土壤总碳、总氮、碳氮比、 $H'$ 、 $E$ 、 $D_{MC}$ 、含水量进行双因素方差分析。用RGui中的vegan包对玉米和大豆秸秆处理下的杂草群落进行基于Bray-Curtis距离的非度量多维尺度分析(Non-metric multidimensional scaling, NMDS)。通过RGui以作物种类分组对包括秸秆处理在内的所有解释变量进行主成分分析(Principal component analysis, PCA)。使用RGui

中 ggplot2 进行图形可视化。

## 2 结果与分析

### 2.1 田间杂草物种组成及主要杂草种类

#### 2.1.1 冬闲期主要杂草物种组成及主要杂草种类

冬闲期出现的杂草共有 16 种, 分属 12 科 16 属 (表 1)。其中, 菊科 4 属 4 种, 占总种数和总属数的 25.00%, 为发生种类最大的科; 其次为十字花科 2 属 2 种, 占总种数和总属数的 12.50%。玄参科、藜科、禾本科、石竹科、莎草科、柳叶菜科、蝶形花科、酢浆草科、牻牛儿苗科、大麻科各 1 属 1 种, 分别占总属数和总种数的

6.25%。其中, 一年生杂草有 6 种, 多年生杂草有 7 种, 多生活史杂草有 3 种, 分别占总种数的 37.50%、43.75% 和 18.75%, 外来杂草有 9 种, 占总种数的 56.25%。

#### 2.1.2 生长季主要杂草物种组成及主要杂草种类

在作物生长季, 实验样地内的主要杂草为 12 种, 分属 8 科 12 属 (表 2)。其中, 禾本科 3 属 3 种, 菊科 3 属 3 种, 共占总种数和总属数的 50.00%, 为发生种类最大的两科。大戟科、莎草科、藜科、马齿苋科、旋花科、苋科各 1 属 1 种, 分别占总属数和总种数的 8.33%。其中, 一年生杂草有 10 种, 占总种数的 83.33%, 多生活史杂草有 2 种, 占总种数 16.67%, 无多

表 1 冬闲期田间主要杂草种类

Table 1 Main weed species in winter fallow field

| 科 Family             | 属 Genus                 | 种 Specy                              | 生活史策略 Life history strategy | 来源 Origin |
|----------------------|-------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|-----------|
| 玄参科 Scrophulariaceae | 婆婆纳属 <i>Veronica</i>    | 阿拉伯婆婆纳 <i>Veronica persica</i>       | 一或二年生                       | 外来        |
| 藜科 Chenopodiaceae    | 藜属 <i>Chenopodium</i>   | 灰绿藜 <i>Chenopodium glaucum</i>       | 一年生                         | 本土        |
| 禾本科 Poaceae          | 狗尾草属 <i>Setaria</i>     | 狗尾草 <i>Setaria viridis</i>           | 一年生                         | 本土        |
| 石竹科 Caryophyllaceae  | 无心菜属 <i>Arenaria</i>    | 无心菜 <i>Arenaria serpyllifolia</i>    | 一或二年生                       | 本土        |
| 莎草科 Cyperaceae       | 莎草属 <i>Cyperus</i>      | 香附子 <i>Cyperus rotundus</i>          | 多年生                         | 外来        |
| 菊科 Asteraceae        | 飞蓬草属 <i>Erigeron</i>    | 小飞蓬 <i>Erigeron canadensi</i>        | 一年生                         | 外来        |
| 菊科 Asteraceae        | 苦苣菜属 <i>Ixeris</i>      | 苦苣菜 <i>Ixeris polycephala</i>        | 一年生                         | 外来        |
| 柳叶菜科 Onagraceae      | 山桃草属 <i>Gaura</i>       | 山桃草 <i>Gaura lindheimeri</i>         | 多年生                         | 外来        |
| 蝶形花科 Papilionaceae   | 苜蓿属 <i>Medicago</i>     | 紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>          | 多年生                         | 本土        |
| 十字花科 Cruciferae      | 播娘蒿属 <i>Descurainia</i> | 播娘蒿 <i>Descurainia sophia</i>        | 一年生                         | 本土        |
| 十字花科 Cruciferae      | 芥属 <i>Capsella</i>      | 芥 <i>Capsella bursa-pastoris</i>     | 一或二年生                       | 外来        |
| 菊科 Compositae        | 鬼针草属 <i>Bidens</i>      | 鬼针草 <i>Bidens pilosa</i>             | 一年生                         | 外来        |
| 酢浆草科 Oxalidaceae     | 酢浆草属 <i>Oxalis</i>      | 酢浆草 <i>Oxalis corniculata</i>        | 多年生                         | 本土        |
| 牻牛儿苗科 Geraniaceae    | 老鹳草属 <i>Geranium</i>    | 老鹳草 <i>Geranium wilfordii</i> Maxim. | 多年生                         | 外来        |
| 菊科 Asteraceae        | 紫菀属 <i>Aster</i>        | 钻叶紫菀 <i>Aster tataricus</i>          | 多年生                         | 外来        |
| 大麻科 Cannabaceae      | 葎草属 <i>Humulus</i>      | 葎草 <i>Humulus scandens</i>           | 多年生                         | 本土        |

表 2 来年生长季主要田间杂草种类

Table 2 Main weed species in subsequently growing season

| 科 Family           | 属 Genus               | 种 Specy                         | 生活史策略 Life history strategy | 来源 Origin |
|--------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------------|-----------|
| 禾本科 Poaceae        | 马唐属 <i>Digitaria</i>  | 马唐 <i>Digitaria sanguinalis</i> | 一年生                         | 本土        |
| 大戟科 Euphorbiaceae  | 铁苋菜属 <i>Acalypha</i>  | 铁苋菜 <i>Acalypha australis</i>   | 一年生                         | 本土        |
| 莎草科 Cyperaceae     | 莎草属 <i>Cyperus</i>    | 香附子 <i>Cyperus rotundus</i>     | 一或二年生                       | 本土        |
| 菊科 Asteraceae      | 鳢肠属 <i>Eclipta</i>    | 鳢肠 <i>Eclipta prostrata</i>     | 一年生                         | 外来        |
| 菊科 Asteraceae      | 苦苣菜属 <i>Ixeris</i>    | 苦苣菜 <i>Ixeris polycephala</i>   | 一年生                         | 外来        |
| 禾本科 Poaceae        | 狗尾草属 <i>Setaria</i>   | 狗尾草 <i>Setaria viridis</i>      | 一或二年生                       | 本土        |
| 藜科 Chenopodiaceae  | 藜属 <i>Chenopodium</i> | 灰绿藜 <i>Chenopodium glaucum</i>  | 一年生                         | 不详        |
| 马齿苋科 Portulacaceae | 马齿苋属 <i>Portulaca</i> | 马齿苋 <i>Portulaca oleracea</i>   | 一年生                         | 本土        |
| 旋花科 Convolvulaceae | 牵牛属 <i>Pharbitis</i>  | 牵牛 <i>Pharbitis nil</i>         | 一年生                         | 外来        |
| 禾本科 Poaceae        | 稗属 <i>Eleusine</i>    | 牛筋草 <i>Eleusine indica</i>      | 一年生                         | 本土        |
| 苋科 Amaranthaceae   | 苋属 <i>Amaranthus</i>  | 苋 <i>Amaranthus tricolor</i>    | 一年生                         | 外来        |
| 菊科 Asteraceae      | 鬼针草属 <i>Bidens</i>    | 鬼针草 <i>Bidens pilosa</i>        | 一年生                         | 外来        |

年生杂草,外来杂草有5种,占总种数的41.67%。

### 2.1.3 冬闲期和生长季杂草群落相似性比较

对比冬闲期和作物生长季杂草群落发现,两时期共同出现的杂草仅有5种,分别是禾本科的狗尾草,莎草科的香附子,菊科的苦苣菜、鬼针草以及藜科的灰绿藜(表1、表2)。且通过非度量多维尺度分析(图2)得知,冬闲期杂草群落与生长季杂草群落之间的相似性较低,即冬闲期杂草群落对来年生生长季杂草群落的影响较小。

### 2.2 不同秸秆覆盖处理下3种农作物田间杂草发生差异

3种不同作物类型的田间杂草多样性在SR处理下的差异并不显著,但其差异随着秸秆还田处理的变化而出现显著分化(表3)。而在DS处理下,3种农作物田间杂草的多样性差异显著,其Shannon多样性指数表现为大豆>花生>玉米,Shannon均匀度指数表现为大豆>玉米( $P<0.01$ )、大豆>花生( $P<0.01$ ),Margalef物种丰富度指数表现为大豆>玉米( $P<0.01$ )、花生>玉米( $P<0.01$ )。同种作物在不同秸秆还田处理下,其田间杂草发生情况的差异也随作物种类的不同而有所不同(表3)。在玉米地中,随着秸秆还田处理的变化,其田间杂草的发生情况表现为:SR和FS的杂草区系Shannon多样性指数要显著大于DS( $P<0.01$ ),DS处理下田间杂草的Shannon均匀度指数显著小于SR,DS下杂草的Margalef物种丰富度指数显著低于FS和SR( $P<0.01$ );相反,在大豆地中,FS和DS处理下的田间杂草Shannon多样性指数显著大于SR( $P<0.01$ ),DS下田间杂草的Shannon均匀度指数显著高于FS和SR

两种处理( $P<0.01$ );而在花生地中,不同秸秆还田处理下田间杂草的3种多样性指数都不显著。

由Bray-Curtis距离得知,3种不同作物类型的样地在SR处理下的杂草群落相似度较高。除此之外,花生样地在3种不同秸秆还田处理下的杂草群落相似度均较高,而玉米和大豆在不同秸秆还田处理下的差异明显,并且这种差异随着秸秆还田梯度逐渐扩大(表4)。以两种秸秆还田处理下(包括FS和DS两种处理)的3种不同作物类型为6个分类单元,以各样地的物种种类为依据进行非度量多维尺度分析(NMDS),结果表明,玉米地和大豆地在秸秆还田处理下的杂草群落分化最为明显(图3)。

### 2.3 不同秸秆覆盖处理下3种农作物田地土壤理化性质的差异

研究结果表明,不同作物类型田地的土壤理化性质对秸秆还田处理的响应各有不同。其中玉米地和大豆地对秸秆还田处理的响应较为敏感,而花生地对秸秆还田处理的响应不敏感。在SR处理下,3种不同作物样地间的各指标差异都不显著,仅总碳含量表现为大豆地显著高于花生地( $P<0.01$ )(表5)。

同种作物类型在不同秸秆处理下的土壤总氮含量具体表现为:大豆地中DS>FS( $P<0.01$ )、DS>SR( $P<0.01$ ),而在玉米和花生地中,其土壤总氮含量在不同秸秆还田处理下的差异并不显著。在FS处理下,3种作物田地土壤总氮含量无显著差异。然而,在DS处理下,不同作物田地土壤总氮含量开始出现分化,表现为大豆>玉米>花生( $P<0.01$ )(表5)。

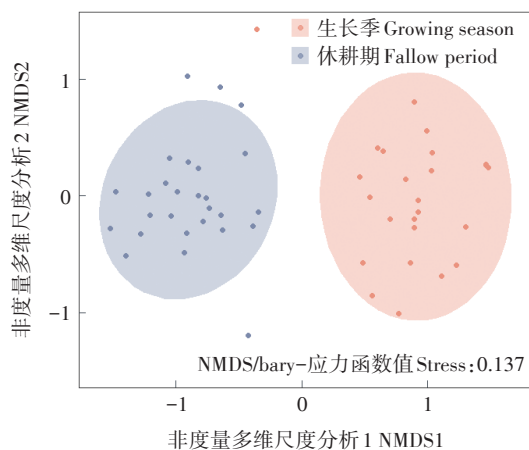


图2 基于Bray-Curtis距离的非度量多维尺度分析冬闲期与作物生长季的田间杂草区系

Figure 2 The Non-metric multidimensional scaling (NMDS) based on Bray-Curtis distance of weed flora in winter fallow period and growing season

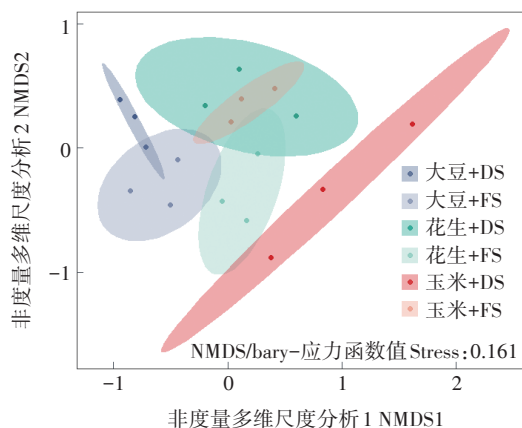


图3 基于Bray-Curtis距离的非度量多维尺度分析3种作物在两种秸秆还田处理下的田间杂草区系

Figure 3 The Non-metric Multidimensional Scaling (NMDS) based on Bray-Curtis distance of weed flora in fields of three different crops under two straw returning treatments

表3 不同秸秆覆盖处理下3种农作物田间杂草的Shannon多样性指数、Shannon均匀度指数及Margalef物种丰富度指数

Table 3 The Shannon's diversity index, Shannon's evenness index and Margalef's richness index of weeds in three different crop fields under different straw treatments

| 作物类型 Crop  | 秸秆还田方式 Straw treatment | Shannon多样性指数 $H'$ | Shannon均匀度指数 $E$ | Margalef物种丰富度指数 $D_{MC}$ |
|------------|------------------------|-------------------|------------------|--------------------------|
| 玉米 Maize   | SR                     | 0.67±0.04Aa       | 0.20±0.02Aa      | 1.70±0.21Aa              |
|            | FS                     | 0.50±0.03Aa       | 0.16±0.01Aab     | 1.54±0.18Aa              |
|            | DS                     | 0.19±0.05Cb       | 0.08±0.01Bb      | 0.54±0.13Bb              |
| 花生 Peanut  | SR                     | 0.50±0.07Aa       | 0.14±0.04Aa      | 1.44±0.32Aa              |
|            | FS                     | 0.57±0.13Aa       | 0.16±0.04Aa      | 1.21±0.43Aa              |
|            | DS                     | 0.50±0.10Ba       | 0.15±0.04Ba      | 1.58±0.27Aa              |
| 大豆 Soybean | SR                     | 0.50±0.08Ab       | 0.15±0.01Ab      | 1.38±0.35Aa              |
|            | FS                     | 0.68±0.09Aa       | 0.19±0.03Ab      | 1.87±0.44Aa              |
|            | DS                     | 0.63±0.03Aa       | 0.27±0.02Aa      | 1.73±0.17Aa              |

注:不同大写字母表示不同作物类型间差异的显著性,不同小写字母表示同种作物不同秸秆还田处理下差异的显著性。下同。

Note: Different capital letters indicate the significant difference among different crop types of the same straw treatment, and different lowercase letters indicate the significant difference among different straw returning treatments of the same crop. The same below.

表4 9种不同处理下样地间的Bray-Curtis距离

Table 4 The Bray-Curtis distance of nine kinds of plots under different treatments

| 处理 Treatment | S2   | S1   | S0   | M2   | M1   | M0   | P2   | P1   |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| S1           | 0.53 |      |      |      |      |      |      |      |
| S0           | 0.61 | 0.43 |      |      |      |      |      |      |
| M2           | 0.72 | 0.63 | 0.54 |      |      |      |      |      |
| M1           | 0.54 | 0.42 | 0.35 | 0.42 |      |      |      |      |
| M0           | 0.53 | 0.41 | 0.40 | 0.47 | 0.27 |      |      |      |
| P2           | 0.61 | 0.47 | 0.39 | 0.53 | 0.27 | 0.28 |      |      |
| P1           | 0.66 | 0.45 | 0.46 | 0.59 | 0.38 | 0.31 | 0.31 |      |
| P0           | 0.67 | 0.49 | 0.45 | 0.62 | 0.42 | 0.34 | 0.31 | 0.27 |

注:S0代表秸秆移除处理下的大豆地,S1代表全量秸秆还田处理下的大豆地,S2代表双倍秸秆还田处理下的大豆地,M0代表秸秆移除下的玉米地,M1代表全量秸秆还田处理下的玉米地,M2代表双倍秸秆还田处理下的玉米地,P0代表秸秆移除处理下的花生地,P1代表全量秸秆还田处理下的花生地,P2代表双倍秸秆还田处理下的花生地。

Note:S0 represents soybean land under straw removal, S1 represents soybean land under full straw return treatment, S2 represents soybean land under double straw return treatment, M0 represents maize land under straw removal, M1 represents corn land under full straw return treatment, M2 represents corn land under double straw return treatment, P0 represents peanut land under straw removal, P1 represents peanut land under full straw returning treatment, P2 represents peanut land under double straw returning treatment.

表5 不同秸秆覆盖处理下3种农作物田地土壤理化性质

Table 5 The soil physical and chemical properties of weeds in three different crop fields under different straw treatments

| 作物 Crop    | 秸秆还田方式 Straw treatment | 土壤总氮 Total nitrogen/(g·kg <sup>-1</sup> ) | 土壤总碳 Total carbon/(g·kg <sup>-1</sup> ) | 碳氮比 C/N Ratio | 土壤含水量 Water moisture/% |
|------------|------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------|---------------|------------------------|
| 玉米 Maize   | SR                     | 0.49±0.01Aa                               | 15.36±0.16Abc                           | 31.43±0.52Ab  | 32.23±1.30Ab           |
|            | FS                     | 0.52±0.02Aa                               | 17.18±0.57Ab                            | 33.06±0.70Aab | 40.30±1.04Aa           |
|            | DS                     | 0.53±0.03Ba                               | 18.65±0.80Aa                            | 35.14±1.25Aa  | 42.03±1.53Aa           |
| 花生 Peanut  | SR                     | 0.47±0.02Aa                               | 14.19±0.27Ba                            | 29.98±0.80Aa  | 30.63±1.50Aa           |
|            | FS                     | 0.47±0.03Aa                               | 15.42±0.30Ba                            | 32.60±1.63Aa  | 29.50±0.60Ca           |
|            | DS                     | 0.45±0.02Ca                               | 15.41±0.36Ca                            | 34.41±0.75Aa  | 30.63±0.55Ba           |
| 大豆 Soybean | SR                     | 0.49±0.02Ab                               | 15.99±0.17Ab                            | 32.43±1.25Aa  | 30.63±2.05Ab           |
|            | FS                     | 0.54±0.02Ab                               | 16.19±0.56Aab                           | 29.97±0.87Aab | 33.63±0.64Bb           |
|            | DS                     | 0.64±0.04Aa                               | 17.31±0.44Ba                            | 27.31±2.12Bb  | 39.9±0.82Aa            |

同种作物类型在不同秸秆处理下的土壤总碳含量具体表现为:大豆地中 $DS>SR$  ( $P<0.05$ ),而在玉米地中表现为 $DS>FS>SR$  ( $P<0.01$ ),花生地土壤总碳含量在不同秸秆还田处理下均不显著。在 $FS$ 处理下,玉米和大豆地的土壤总碳含量均显著高于花生地 ( $P<0.01$ )。在 $DS$ 处理下,3种作物类型田地土壤总碳含量的差异则表现为玉米>大豆>花生 ( $P<0.01$ ) (表5)。

不同处理间的土壤碳氮比表现为:大豆地中 $DS<SR$  ( $P<0.01$ ),玉米地的土壤碳氮比随着秸秆还田量的增加而升高,并在 $DS$ 处理下达到显著 ( $P<0.05$ ),花生地土壤碳氮比则对秸秆还田处理无显著响应。在 $FS$ 处理下,3种作物田地土壤碳氮比无显著差异,而在 $DS$ 处理下,大豆地的土壤碳氮比要显著 ( $P<0.01$ ) 低于其他两种作物田地 (表5)。

玉米和大豆的土壤含水量对不同秸秆还田处理的响应显著,而花生地的土壤含水量则对秸秆还田处理并不敏感。其土壤含水量具体表现为:大豆地中 $DS>FS$ 、 $DS>SR$  ( $P<0.01$ ),玉米地中 $FS>SR$ 、 $DS>SR$  ( $P<0.01$ ),而3种秸秆还田处理下的花生地土壤含水量间的差异并不显著。不同作物样地的土壤含水量在 $FS$ 处理下出现分化,表现为玉米>大豆 ( $P<0.01$ )、玉米>花生 ( $P<0.01$ )、大豆>花生 ( $P<0.05$ ),在 $DS$ 处理下为玉米>花生 ( $P<0.01$ )、大豆>花生 ( $P<0.01$ ) (表5)。

### 3 讨论

#### 3.1 不同秸秆还田处理对3种作物冬闲期间杂草群落的直接影响

玉米和大豆样地在秸秆还田后出现了杂草区系的分化,主要表现为秸秆添加会增加大豆样地中杂草群落多样性,而玉米样地杂草群落多样性会随着秸秆还田梯度的增加而降低。NMDS的结果显示,玉米和大豆样地中杂草区系的相似度也随着秸秆还田梯度增加而降低。玉米秸秆还田处理下杂草多样性降低可能是由于本实验秸秆还田属于秸秆覆盖还田,在一定程度上会抑制杂草种子萌发及风传种的定植<sup>[18-19]</sup>,相比于大豆和花生,玉米秸秆量较大,特别是在双倍秸秆添加处理下,其田间杂草多样性显著降低。王国忠等<sup>[20]</sup>也认为秸秆还田对田间杂草的影响具有一定的不确定性,这种不确定性在一定程度上是由秸秆还田方式、秸秆种类以及秸秆量导致的。而大豆秸秆还田后所引起的杂草多样性提升可能是由于外源还田秸秆本身的高氮含量有利于杂草种子的萌发,同时提高其萌发温度生态

位宽度<sup>[21]</sup>,其次,适量的大豆秸秆还田还能够减少土壤水分蒸发,提高土壤湿度,从而利于杂草的发生和生长<sup>[22]</sup>,这与本研究结果中大豆地在双倍秸秆还田处理下相比秸秆移除显著提升了土壤含水量是一致的。

#### 3.2 不同秸秆处理通过改变土壤碳氮而对冬闲期杂草群落产生的间接影响

研究发现大豆秸秆还田会显著提升土壤总氮含量,在2年的实验处理期内,玉米秸秆还田会显著提升土壤总碳含量,从而导致随着秸秆还田梯度增加,大豆地土壤碳氮比会随秸秆添加梯度增加而下降,而玉米地土壤碳氮比会随秸秆还田梯度增加而升高。这可能是不同作物本身秸秆化学计量比不同导致的。秸秆还田后,随着秸秆的淋溶和分解,土壤有机碳含量增加<sup>[23]</sup>,在处理期间提高了土壤总碳的含量,主成分分析也表明秸秆还田梯度与土壤总碳有明显的正相关关系。因此,探究在外源碳添加条件下土壤碳氮比的变化,本质是评价其土壤有机碳矿化积累量和碳固存的平衡。不同空间尺度上的研究都发现秸秆添加处理下,秸秆碳氮比与有机碳矿化积累量呈负相关<sup>[24-25]</sup>,张继旭等<sup>[26]</sup>通过不同秸秆添加的室内实验比较得出玉米秸秆的土壤碳矿化积累量最高。以往研究发现大豆秸秆碳氮比约为75,而玉米秸秆碳氮比高达107<sup>[27]</sup>,这就导致还田的高碳氮比玉米秸秆与原位土壤耦合形成的碳库的有机碳矿化速率要低于难分解有机碳固存的速率,造成还田后土壤碳素积累、土壤碳氮比升高的情况,反之碳氮比相对较低的大豆秸秆在输入土壤后会提高其土壤碳矿化速率,并且同时向土壤中输入氮素,进而降低土壤碳氮比。

主成分分析结果表明,用于评价杂草多样性的3种指数均与土壤碳氮比呈明显的负相关关系 (图4)。

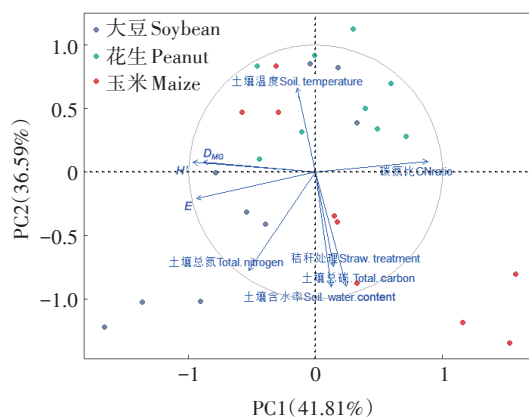


图4 不同类型农作物样地主成分分析(PCA)

Figure 4 The principal component analysis (PCA) of plots for different types of crop

玉米秸秆量大且碳氮比高,导致还田后田间土壤碳氮比显著高于其他两种作物样地。过高的碳氮比不适宜土壤微生物生存,且氮素的缺乏也难以供给多样性过高的农田杂草区系,从而促使随秸秆还田量的增加,杂草区系多样性下降。大豆作为固氮植物,其秸秆在还田分解后使得土壤的氮含量上升,从而为杂草生长和发生提供了良好的养分,且其低碳氮比的秸秆也显著降低了土壤的碳氮比,在双倍秸秆还田处理下,土壤碳氮比下调至27,接近土壤微生物最适宜进行分解活动的碳氮比<sup>[28]</sup>。合理的土壤碳氮比可为微生物提供充足的底物,使其新陈代谢更加旺盛,分解土壤中有有机物的速率更快<sup>[29]</sup>,其释放的矿质养分就更容易被杂草所吸收利用<sup>[30]</sup>。而花生秸秆虽然也有较低的碳氮比,但是其氮素主要积累于生物量集中的地下部分<sup>[27]</sup>,因此其秸秆还田量较低,可延续的养分有限,导致其间杂草群落多样性变化并不明显。

生长季时期杂草多样性主要受施肥的影响而形成以禾本科(如马唐)为优势种的杂草群落,两时期共同出现的杂草仅有5种,分别是禾本科的狗尾草,莎草科的香附子,菊科的苦苣菜、鬼针草以及藜科的灰绿藜,这表明冬闲期的杂草与作物生长季的杂草并没有明显的相关关系。因此,适当的秸秆添加能够在不影响来年作物生长季杂草危害的情况下提高农田生态系统生物多样性。冬闲期杂草多样性的提高在一定程度上也可促进土壤碳氮循环<sup>[31]</sup>,改善农田土壤。通过合理的农业管理措施可促进农田生态系统多样性和土壤养分的良性循环。

## 4 结论

(1)不同作物秸秆还田对冬闲期田间杂草发生的影响不同。大豆地田间杂草多样性在秸秆还田处理下显著增加,而玉米地田间杂草多样性在秸秆还田处理下会显著降低,且二者田间杂草区系的差异随着秸秆添加量增加而扩大,花生地田间杂草多样性对秸秆还田处理的响应则并不显著。

(2)由于不同秸秆自身碳氮比不同,不同秸秆还田处理下土壤碳氮的变化也不同。大豆秸秆还田会显著提升土壤总氮含量,而玉米秸秆还田则会显著提升土壤总碳含量,随着秸秆还田量的增加,大豆地土壤碳氮比下降,而玉米地土壤碳氮比升高,花生地土壤碳氮比在秸秆还田处理下变化不显著。此外,秸秆还田后的土壤碳氮比与田间杂草群落多样性显著负相关。

(3)冬闲期杂草群落多样性与来年生长季杂草群落差异较大,因此冬闲期杂草群落多样性变化并不会影响来年生长季杂草的发生。因而,基于本实验研究结果,在冬闲期针对不同秸秆特性进行还田,可以在一定程度上控制田间杂草群落的组成,提高农田生态系统多样性,进而改善土壤碳氮养分,为来年作物种植提供良好的土壤基础。

## 参考文献:

- [1] 强胜. 我国杂草学研究现状及其发展策略[J]. 植物保护, 2010, 36(4): 1-5. QIANG S. Research status and development strategy of weed science in China[J]. *Plant Protection*, 2010, 36(4): 1-5.
- [2] LI S, HUANG G. A review of research directions and research methods of farmland weeds[J]. *NASS Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 3(2): 58-62.
- [3] APPELEBY A P. A history of weed control in the United States and Canada: A sequel[J]. *Weed Science*, 2005, 53(6): 762-768.
- [4] OUNI A, RABAAOUI N, MECCHI L, et al. Removal of pesticide chlorobenzene by anodic degradation: Variable effects and mechanism[J]. *Journal of Saudi Chemical Society*, 2021, 25(10): 101326.
- [5] 杨梅, 刘念, 阎艳, 等. 农田景观和管理方式对稻田系统植物多样性的复合影响[J]. 生态科学, 2021, 40(1): 43-51. YANG M, LIU N, YAN Y, et al. Compound effects of farmland landscape and management on plant diversity in rice field system[J]. *Ecological Science*, 2021, 40(1): 43-51.
- [6] HECTOR A, BELL T, HAUTIER Y, et al. BUGS in the analysis of biodiversity experiments: Species richness and composition are of similar importance for grassland productivity[J]. *PLoS One*, 2011, 6(3): 17434.
- [7] GOPINATH K A, PANDEY J. Weed management in transplanted rice (*Oryza sativa*) and its residual effect on weed and yield of succeeding wheat (*Triticum aestivum*) [J]. *Indian Journal of Agronomy*, 2004, 49(4): 226-229.
- [8] 张泽溥. 我国农田杂草治理技术的发展[J]. 植物保护, 2004(2): 28-33. ZHANG Z B. Development of weed control technology in farmland in China[J]. *Plant Protection*, 2004(2): 28-33.
- [9] OLSEN J, KRISTENSEN L, WEINER J. Influence of sowing density and spatial pattern of spring wheat (*Triticum aestivum*) on the suppression of different weed species[J]. *Weed Biology and Management*, 2006, 6(3): 165-173.
- [10] 张晓文, 赵改宾, 杨仁全, 等. 农作物秸秆在循环经济中的综合利用[J]. 农业工程学报, 2006(增刊1): 107-109. ZHANG X W, ZHAO G B, YANG R Q, et al. Comprehensive utilization of crop straw in circular economy[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006(Suppl 1): 107-109.
- [11] 黄爱军, 赵锋, 陈雪凤, 等. 施肥与秸秆还田对太湖稻-油复种系统春季杂草群落特征的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(6): 515-521. HUANG A J, ZHAO F, CHEN X F, et al. Effects of fertilization and straw returning on spring weed community characteristics in rice-oil multiple cropping system in Taihu Lake[J]. *Resources and*

- Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(6):515-521.
- [12] 韩惠芳, 宁堂原, 田慎重, 等. 土壤耕作及秸秆还田对夏玉米田杂草生物多样性的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(5):1140-1147. HAN H F, NING T Y, TIAN S Z, et al. Effects of soil tillage and straw returning on weed biodiversity in summer maize field[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(5):1140-1147.
- [13] 付佑胜, 刘伟中, 张凯, 等. 麦秸秆高留茬条件下不同秸秆覆盖量对稻田杂草及水稻产量的影响[J]. 西南农业学报, 2019, 32(10):2313-2318. FU Y S, LIU W Z, ZHANG K, et al. Effects of different straw mulching amount on weeds and rice yield in rice field under high stubble condition[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 32(10):2313-2318.
- [14] 丁洁. 乡村振兴背景下深入推进耕地轮作休耕制度试点研究[J]. 四川环境, 2021, 40(3):205-208. DING J. Pilot study on deeply promoting cultivated land rotation and fallow system under rural revitalization background[J]. *Sichuan Environment*, 2021, 40(3):205-208.
- [15] NAGY K, LENGUEL A, KOVACS A, et al. Weed species composition of small-scale farmlands bears a strong crop-related and environmental signature[J]. *Weed Research*, 2018, 58(1):46-56.
- [16] 张光辉, 费宇红, 王茜, 等. 灌溉农业的地下水保障能力评价方法研究——黄淮海平原为例[J]. 水利学报, 2016, 47(5):608-615. ZHANG G H, FEI Y H, WANG Q, et al. Study on evaluation method of groundwater security capacity in irrigated agriculture: A case study of Huang-Huai-Hai Plain[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(5):608-615.
- [17] 李博, 杨持, 林鹏. 生态学[M]. 北京:中国高等教育出版社, 2000:239-240. LI B, YANG C, LIN P. Ecology[M]. Beijing:China Higher Education Press, 2000:239-240.
- [18] 龚静静, 胡宏祥, 朱昌雄, 等. 秸秆还田对农田生态环境的影响综述[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(23):36-40. GONG J J, HU H X, ZHU C X, et al. Review on the effects of straw returning to farmland on farmland ecological environment[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(23):36-40.
- [19] 胡实, 彭娜, 谢小立, 等. 农田秸秆覆盖保墒研究[J]. 中国农业气象, 2007, 28(1):49-53. HU S, PENG N, XIE X L, et al. Study on soil moisture retention by straw mulching[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2007, 28(1):49-53.
- [20] 王国忠, 杨佩珍, 陆峥嵘, 等. 秸秆还田对稻麦田间杂草发生的影响及化除效果[J]. 上海农业学报, 2004, 20(1):87-90. WANG G Z, YANG P Z, LU Z R, et al. Effects of straw returning on the occurrence of weeds in rice and wheat field and its removal effect[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2004, 20(1):87-90.
- [21] 刘阳. 氮添加和放牧干扰对高寒草甸群落种子萌发性状组成的影响[D]. 兰州:兰州大学, 2021. LIU Y. Effect of nitrogen addition and grazing disturbance on the composition of seed germination traits in alpine meadow[D]. Lanzhou:Lanzhou University, 2021.
- [22] 李昌新, 赵锋, 芮雯奕, 等. 长期秸秆还田和有机肥施用对双季稻田冬春季杂草群落的影响[J]. 草业学报, 2009, 18(3):142-147. LI C X, ZHAO F, RUI W Y, et al. Effects of long-term straw returning and organic fertilizer application on weed community in winter and spring in double cropping rice field[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, 18(3):142-147.
- [23] SMITH P, POWLSON D S. Considering manure and carbon sequestration[J]. *Science*, 2000, 287(5452):428-429.
- [24] 李雪峰, 张岩, 牛丽君, 等. 长白山白桦(*Betula platyphlla*)纯林和白桦山杨(*Populus davidiana*)混交林凋落物的分解[J]. 生态学报, 2007, 27(5):1782-1790. LI X F, ZHANG Y, NIU L J, et al. Litter decomposition in *Betula platyphlla* pure forest and *Populus davidiana* mixed forest[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5):1782-1790.
- [25] 张薇, 王子芳, 王辉, 等. 土壤水分和植物残体对紫色水稻土有机碳矿化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(6):1013-1019. ZHANG W, WANG Z F, WANG H, et al. Effects of soil moisture and plant residues on organic carbon mineralization in purple paddy soil [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2007, 13(6):1013-1019.
- [26] 张继旭, 张继光, 申国明, 等. 不同类型秸秆还田对烟田土壤碳氮矿化的影响[J]. 烟草科技, 2016, 49(3):10-16. ZHANG J X, ZHANG J G, SHENG G M, et al. Effects of different types of straw returning on soil carbon and nitrogen mineralization in tobacco field[J]. *Tobacco Science and Technology*, 2016, 49(3):10-16.
- [27] 何培新, 张炎, 宋永芳. 食用菌原料—几种作物秸秆的碳氮比测定[J]. 食用菌, 2001, 23(4):15-16. HE P X, ZHANG Y, SONG Y F. Determination of C/N ratio of several crop straws[J]. *Edible Fungi*, 2001, 23(4):15-16.
- [28] 柳敏, 张璐, 宇万太, 等. 有机物料中有机碳和有机氮的分解进程及分解残留率[J]. 应用生态学报, 2007, 18(11):2503-2506. LIU M, ZHANG L, YU W T, et al. Decomposition process and residual rate of organic carbon and organic nitrogen in organic materials[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(11):2503-2506.
- [29] 杜宁宁, 邱莉萍, 张兴昌, 等. 半干旱区土地利用方式对土壤碳氮矿化的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(5):73-78. DU N N, QIU L P, ZHANG X C, et al. Effects of land use patterns on soil carbon and nitrogen mineralization in semi-arid region[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(5):73-78.
- [30] 刘玉林, 朱广宇, 邓蕾, 等. 黄土高原植被自然恢复和人工造林对土壤碳氮储量的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(7):2163-2172. LIU Y L, ZHU G Y, DENG L, et al. Effects of natural vegetation restoration and artificial afforestation on soil carbon and nitrogen storage in Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(7):2163-2172.
- [31] JOHNSON K H, VOGT K A, CLARK H J, et al. Biodiversity and the productivity and stability of ecosystems[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 1996, 11(9):372-377.

(责任编辑:叶飞)