

长期水旱轮作条件下不同复种方式对稻田杂草群落的影响*

杨滨娟 黄国勤** 徐宁 王淑彬

(江西农业大学生态科学研究中心, 南昌 330045)

摘要 通过长期田间定位试验,研究了水旱轮作条件下不同复种方式对稻田杂草群落组成及物种多样性的影响.结果表明:复种轮作可显著降低稻田杂草密度,抑制杂草生长.不同复种轮作方式下,紫云英-早稻-晚玉米→紫云英-早玉米间作早大豆-晚稻(CCSR)处理物种优势度最低,能降低优势种杂草地位,减轻危害.不同复种轮作方式下基本杂草群落组成均为鸭舌草+稗草+矮慈姑,杂草群落的相似性均较高,其中紫云英-早稻-晚玉米间作晚大豆→紫云英-早玉米-晚稻(CRCS)处理与CCSR处理的相似度最高.稻田复种轮作可在一定程度上提高对杂草的抑制效果,但需要注意某些次要杂草的危害.

关键词 水旱轮作 复种方式 稻田 杂草群落

文章编号 1001-9332(2013)09-2533-06 **中图分类号** S451 **文献标识码** A

Effects of different multiple cropping systems on paddy field weed community under long term paddy-upland rotation. YANG Bin-juan, HUANG Guo-qin, XU Ning, WANG Shu-bin (Research Center on Ecological Science, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(9): 2533-2538.

Abstract: Based on a long term field experiment, this paper studied the effects of different multiple cropping systems on the weed community composition and species diversity under paddy-upland rotation. The multiple cropping rotation systems could significantly decrease weed density and inhibited weed growth. Among the rotation systems, the milk vetch-early rice-late maize → milk vetch-early maize intercropped with early soybean-late rice (CCSR) had the lowest weed species dominance, which inhibited the dominant weeds and decreased their damage. Under different multiple cropping systems, the main weed community was all composed of *Monochoia vaginalis*, *Echinochloa crusgalli*, and *Sagittaria pygmae*, and the similarity of weed community was higher, with the highest similarity appeared in milk vetch-early rice-late maize intercropped with late soybean → milk vetch-early maize-late rice (CSCR) and in CCSR. In sum, the multiple cropping rotations in paddy field could inhibit weeds to a certain extent, but attentions should be paid to the damage of some less important weeds.

Key words: paddy-upland rotation; multiple cropping system; paddy field; weed community.

杂草是农田生态系统中重要的生物成分之一.利用作物之间的相互作用,保持一定的杂草生物多样性,对于控制病虫害、防治土壤侵蚀、促进土壤养分循环、减少农业化学品的投入和增强农业生态系统的稳定性具有重要作用^[1-4].但由于农田杂草与作物之间存在对光照、土壤养分、水分和生存空间

等资源的竞争,一定程度上降低了作物的产量和质量.据统计,世界上农作物减产因素中,杂草带来的危害占10%以上^[5].我国农田草害面积0.43亿hm²,每年损失粮食1750万t^[6].因此,要全面衡量杂草在农田生态系统中的利弊^[1-2],保证作物的良好生长,就必须对杂草进行合理的控制.利用农田系统生物多样性控制稻田杂草符合农业可持续发展的要求^[7],可以提高资源利用效率^[8-9]、提高农作物的抗性和品质^[10-11]、控制农业有害生物^[12-13]、提高土壤肥力^[14],并减少温室气体排放^[15-16].而作物间

* 国家科技支撑计划项目(2012BAD14B14-01, 2007BAD89B18-03)资助.

** 通讯作者. E-mail: hgqjnc@sina.com

2013-01-14 收稿, 2013-07-13 接受.

作、套种等混合种植,在农田中引入鱼、鸭、蟹等其他物种,都是增加农业生物多样性的有效途径^[17-18]. 实行水旱轮作后,杂草固有的生存环境被改变,因此能取得良好的抑草效果^[19]. 本文通过田间定位试验,探讨了在连续14年水旱轮作的基础上,不同水旱轮作复种方式下稻田杂草群落特征及其物种多样性,以期为我国江南丘陵区双季稻田的杂草综合治理与农业可持续发展提供理论依据和技术支持.

1 研究地区与研究方法

1.1 试验地概况

试验始于1998年冬,在江西农业大学科技园水稻试验田(28°46' N, 115°55' E)进行. 试验地属于亚热带季风性湿润气候,年均太阳总辐射量为 $4.79 \times 10^{13} \text{ J} \cdot \text{hm}^{-2}$,年均日照时数为1852 h,7、8月最多,2、3月最少,光照分布与农作物生长旺季基本同步,对农业生产有利. 年日均温 $\geq 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的积温达6450 $^{\circ}\text{C}$,年降水量1624 mm,年平均气温在17.1~17.8 $^{\circ}\text{C}$. 供试土壤为发育于第四纪的红粘土,为亚热带典型红壤分布区. 试验前表层土壤(0~15 cm) pH值5.59,有机质 $29.48 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $2.17 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮 $38.69 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷 $0.49 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷 $12.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,全钾 $35.85 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $30.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

1.2 试验设计及管理

按照当地稻作方式,试验设置4个处理(表1),每2年轮换一次,每个处理4次重复,共16个小区,小区面积 $11 \text{ m} \times 3 \text{ m} = 33 \text{ m}^2$,随机区组排列. 试验地地势平坦,排灌方便,调查期内所有处理未施用任何除草剂. 供试材料:冬季绿肥紫云英为余江大叶籽,早稻为金优974,早玉米为掖单13,早大豆为南昌本地种,晚稻为金优253,晚玉米为掖单13,晚大豆为南昌本地种.

日常田间管理:早稻用强氯精溶液浸种,洗净后保温催芽,4月28日移栽,移栽行株距为 $20 \text{ cm} \times$

14 cm . 早玉米和早大豆在3月底直播,7月中旬收获,早玉米行株距为 $50 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$,直播10 d后结合间苗补苗,早大豆行距为 15 cm ,直播10 d后结合间苗补苗. 晚稻用强氯精溶液浸种,洗净后保温催芽,播种后于两叶一心期喷施多效唑,7月25日移栽,移栽行株距为 $20 \text{ cm} \times 17 \text{ cm}$. 晚玉米和晚大豆在7月下旬直播,10月下旬收获,晚玉米行株距为 $50 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$,直播15 d后结合间苗补苗,晚大豆直播行距为 15 cm ,直播15 d后结合间苗补苗. 紫云英于每年9月底撒播,第二年4月中旬翻压. 水稻、玉米、大豆采用计算机模拟优化施肥方案. 早稻施纯N $1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,晚稻施纯N $1.07 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,玉米施纯N $1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 水稻氮磷钾肥比例为N : P_2O_5 : $\text{K}_2\text{O} = 1 : 0.8 : 1$,玉米氮磷钾肥比例为N : P_2O_5 : $\text{K}_2\text{O} = 1 : 0.6 : 0.8$. 在施肥过程中,磷肥均作为基肥(紫云英除外),施钙镁磷肥 $1.67 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;施用钾肥时,水稻施氯化钾 $1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,按分蘖肥:孕穗肥:抽穗肥=2:1:1施用,玉米施氯化钾 $1.33 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,按苗肥:穗肥=2:1施用;施用氮肥时,水稻采用基肥:分蘖肥:孕穗肥:抽穗肥=2:1:1:1施入^[20],玉米按基肥:苗肥:穗肥=2:3:5施入. 大豆施钾肥 $0.67 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,按基肥:花肥=1:1施入,钙镁磷肥 $1.67 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,尿素 $0.67 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,均按基肥:花肥=2:3施入. 各处理的施肥量与施肥时间相同. 紫云英不施肥,其他栽培管理方法同一般大田.

1.3 测定项目及方法

晚稻杂草调查于2012年8月20日—9月10日进行(杂草处于花果期,晚稻处于分蘖期). 每小区采取五点对角取样,每样方面积 1 m^2 ,记录各样方内的杂草种类与数量,同时调查每种杂草的覆盖度,并称量地上部鲜质量.

杂草密度为每平方米的杂草株数;物种丰富度(S)为样方中包含的所有杂草的种类数^[21]. Shannon多样性指数: $H' = -\sum P_i \ln P_i$ ($P_i = N_i/N$),式中: N_i 为样方中第*i*物种的个体数, N 为样方总个体数. Simpson优势度指数 $D = \sum P_i^2$;Pielou均匀度指数 $J = H'/\ln S$ ^[22]. 群落结构组成差异 Whittaker 指数 $\beta = S/S_a - 1$,其中, S_a 为处理各样方的平均物种数^[23]. 相对优势度 $RA = (RD + RF)/2$,式中: RD 为相对密度,即某杂草的密度占总密度的比例; RF 为相对频度,即某小区杂草出现的样方数占小区所有杂草出现的总样方数的比例^[24-25]. 群落相似性(Bray-Curtis指数) $C_N = 2j_N / (a_N + b_N)$,式中: j 为群落A与B共有的物

表1 试验设计

Table 1 Experimental design

代码 Code	处理 Treatment	种植模式 Planting pattern
CRR(CK)	紫云英-早稻-晚稻→紫云英-早稻-晚稻	连作系统
CRC	紫云英-早稻-晚玉米→紫云英-早玉米-晚稻	轮作系统
CRCS	紫云英-早稻-晚玉米间作晚大豆→紫云英-早玉米-晚稻	轮作系统
CCSR	紫云英-早稻-晚玉米→紫云英-早玉米间作早大豆-晚稻	轮作系统

种数; a 为群落 A 含有的物种数; b 为群落 B 含有的物种数; a_N 为群落 A 的个体数之和; b_N 为群落 B 的个体数之和; j_N 为群落 A 和群落 B 共有种中个体数较小者之和, 即 $j_N = \sum_{\min}(j_N a + j_N b)^{[23]}$.

1.4 数据处理

运用 Microsoft Excel 软件处理数据. 用 SPSS 系统软件分析数据, 用 LSD 法进行样本平均数的差异显著性比较 ($\alpha = 0.05$).

2 结果与分析

2.1 不同复种轮作方式对稻田杂草种类与密度的影响

由表 2 可知, 不同复种轮作方式对稻田杂草密度有显著影响, 对杂草的抑制效果明显优于连作处理. 从稻田杂草总密度来看, CCSR 处理抑制杂草效果最好, 其次是 CRC 和 CRCS, 连作系统 (CRR) 最差. 在调查区稻田发生危害的杂草共有 8 科 13 种, 其中稗草 (*Echinochloa crusgalli*)、鸭舌草 (*Monochloa vaginalis*)、矮慈姑 (*Sagittaria pygmaea*) 和牛毛毡 (*Eleocharis yokoscensis*) 4 种杂草发生密度较大, 群体数量占田间杂草总量的 70.3%. 复种轮作方式下稻田杂草的发生种类和密度均小于连作稻田, 但对丁香蓼 (*Ludwigia prostrata*)、牛毛毡、碎米莎草 (*Cyperus iria*)、水竹叶 (*Milrdannia trigueta*) 和水花生 (*Alternanthera philoxeroides*) 的抑制作用, 处理间差异不显著 ($P < 0.05$).

2.2 不同复种轮作方式对稻田杂草群落物种多样

性的影响

表 3 可知, CRR 处理杂草物种丰富度最大 (12), 与 CRC 和 CCSR 处理差异显著; CCSR 杂草物种丰富度最小 (6). CRR 处理杂草 Shannon 多样性指数最高, 而 CCSR 处理最低, 处理间未达到显著性差异. 物种优势度可以反映杂草群落中主要杂草发生危害的情况, 优势度降低说明优势种杂草地位的降低及危害的减轻. 从表征优势度的 Simpson 指数来看, CRR 处理的杂草优势度最高, CCSR 处理最低, 不同轮作方式间差异不显著, 与 CRR 处理达到显著性差异. 群落均匀度反映了各种杂草在群落中所处的地位, 群落均匀度提高表明田间杂草趋于均匀分布, 没有优势种发生危害. 从 Pielou 均匀度指数来看, CRR 处理的均匀度指数高于各轮作处理, 且差异显著, 说明在这种方式下田间杂草群落的结构有了很大的变化, 均匀度提高, 从而弱化了稻田优势种杂草在田间的危害. 而轮作系统下稻田杂草均匀度有所下降, 但各处理间未达到显著性差异, 其中 CCSR 处理最低. 因此在生产过程中需要注意某些次要杂草如四叶萍 (*Marsilea quadrifolia*)、水竹叶、碎米莎草等的危害.

2.3 不同复种轮作方式对稻田杂草群落结构组成的影响

杂草在群落中的相对优势度可以反映不同复种轮作方式对稻田杂草群落结构的影响. 由表 4 可知, CRR、CRC 和 CCSR 处理中杂草群落组成均为: 鸭舌草+稗草+矮慈姑; CRCS 处理为: 鸭舌草+稗草+牛毛

表 2 不同种植方式下稻田杂草种类和密度

Table 2 Weed species and density in paddy field under different cropping patterns

科名 Family	杂草种类 Weed species	杂草密度 Weed density ($\text{plant} \cdot \text{m}^{-2}$)				P
		CRR	CRC	CRCS	CCSR	
阔叶杂草 Broadleaf weeds	鸭舌草 <i>M. vaginalis</i>	8.21a	3.11c	5.45b	2.32c	0.0004
	节节菜 <i>Rotala indica</i>	0.77a	0.15c	0c	0.50b	0.0002
	陌上菜 <i>Lindernia procumbens</i>	0.66a	0c	0.27b	0c	0.0001
	丁香蓼 <i>L. prostrata</i>	1.79a	0.82b	0.89ab	0b	0.0168
禾本科 Gramineae	稗草 <i>E. crusgalli</i>	14.95a	5.03c	8.82b	3.10d	0.0001
	李氏禾 <i>Leersia hexandra</i>	1.57a	0.10b	1.00ab	0.20b	0.0372
莎草科 Sedge	牛毛毡 <i>E. yokoscensis</i>	2.96a	2.22a	2.78a	1.08a	0.1715
	碎米莎草 <i>C. iria</i>	0b	0.17b	1.28a	0b	0.0391
鸭跖草科 Commelinaceae	水竹叶 <i>M. trigueta</i>	1.02a	0b	0.50ab	0b	0.1231
苋科 Amaranthaceae	水花生 <i>A. philoxeroides</i>	1.79a	0.55ab	1.00ab	0b	0.0246
泽泻科 Alismataceae	矮慈姑 <i>S. pygmaea</i>	5.37a	2.04b	0.76b	2.14b	0.0011
早熟禾科 Poaceae	马唐 <i>Ditaria sanguinalis</i>	0.88a	0.39b	0c	0c	0.0001
萍科 Marsilaceae	四叶萍 <i>Marsilea quadrifolia</i>	0.20a	0b	0.30a	0b	0.0252
	合计 Total	40.17a	14.58c	23.05b	9.34d	0.0001

同行不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different letters in the same row meant significant difference at 0.05 level among treatments. 下同 The same below.

表 3 不同种植方式下稻田杂草群落物种多样性
Table 3 Species diversity of weed community in paddy field under different cropping patterns

指数 Index	CRR (CK)	CRC	CRCS	CCSR
物种丰富度 Species richness	12a	10b	11ab	6c
Shannon 多样性指数 Shannon diversity index	1.900a	1.009a	1.363a	0.695a
Simpson 优势度指数 Simpson dominance index	0.209a	0.028b	0.074b	0.013b
Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index	0.765a	0.438b	0.568b	0.388b
Whittaker 指数 Whittaker index	0.494b	0.908a	0.746a	0.422b

表 4 不同种植方式下稻田杂草的优势度
Table 4 Relative dominance of weed species in paddy field under different cropping patterns

杂草种类 Weed species	相对优势比 Relative dominance			
	CRR (CK)	CRC	CRCS	CCSR
鸭舌草 <i>M. vaginalis</i>	0.446a	0.168b	0.287ab	0.118b
水花生 <i>A. philoxeroides</i>	0.105a	0.044ab	0.055ab	0b
稗草 <i>E. crusgalli</i>	0.795a	0.276bc	0.461b	0.168c
牛毛毡 <i>E. yokoscensis</i>	0.134a	0.116a	0.129a	0.057a
碎米莎草 <i>C. iria</i>	0b	0.004b	0.062a	0b
水竹叶 <i>M. triquetra</i>	0.056a	0b	0.043a	0b
节节菜 <i>R. indica</i>	0.049a	0.034a	0b	0.043a
李氏禾 <i>L. hexandra</i>	0.099a	0.033c	0.055b	0.035c
陌上菜 <i>L. procumbens</i>	0.047a	0b	0.037a	0b
丁香蓼 <i>L. prostrata</i>	0.105a	0.051ab	0.052ab	0b
矮慈姑 <i>S. pygmaea</i>	0.315a	0.141b	0.049b	0.144b
马唐 <i>D. sanguinalis</i>	0.052a	0.040a	0b	0b
四叶葎 <i>M. quadrifolia</i>	0.035a	0b	0.038a	0b

毡,牛毛毡为主要优势杂草,矮慈姑的优势地位明显降低,几乎没有出现. Whittaker 指数可以反映杂草群落结构在不同环境选择压力下的变化,在一定程度上能够准确反映群落物种的更替程度^[23]. CRR、CRC、CRCS 和 CCSR 处理的 Whittaker 指数分别为 0.494、0.908、0.746 和 0.422 (表 3),由此可见,轮作系统中 CRC 处理对杂草群落结构及物种组成的影响最显著,CRCS 处理次之.

2.4 不同复种轮作方式对稻田杂草群落相似性的影响

从 Bray-Curtis 群落相似性指数来看 (表 5), 轮

表 5 不同种植方式下稻田杂草群落的相似性指数
Table 5 Similarity index of weed communities in paddy field under different cropping patterns

处理 Treatment	Bray-Curtis 指数 Bray-Curtis index			
	CRR (CK)	CRC	CRCS	CCSR
CRR (CK)	-			
CRC	0.033	-		
CRCS	0.016	0.048	-	
CCSR	0.045	0.027	0.069	-

作系统下 3 种复种方式间杂草群落的相似性均较高,其中 CRCS 与 CCSR 处理的相似度最高 (0.069),其次是 CRC 与 CRCS 处理 (0.048),CRR 与 CRCS 处理间杂草群落的相似性最低,仅为 0.016.

3 讨 论

3.1 不同稻作方式对杂草群落的影响

稻田和旱地杂草各有不同的生态和适应习性. 稻田水旱轮作系统能够改善农田杂草危害,有利于作物的生长发育,同时能减少农药和除草剂的使用,达到减轻农田环境污染的作用^[26-27]. 黄国勤等^[28]研究指出,与连作相比,轮作方式对杂草的生长有一定的抑制作用. 孙雪等^[29]研究发现,冬种黑麦草可以抑制农田杂草,减少甚至避免农田中植株较大的杂草的生长,降低杂草对农作物的危害. 魏守辉等^[30]研究发现,小麦和玉米轮作使田间马唐、碎米莎草和飘拂草等的相对优势度显著上升,而鸭舌草和水苋菜等的相对优势度显著下降. 杨荣等^[31]、田欣欣等^[32]、Légère 等^[33]通过多年研究发现,不同耕作措施通过改变土壤表层理化性状、土壤温度和湿度等农田环境,不但对杂草多样性有影响,而且对杂草群落组成的影响也非常显著,进而影响了作物的生长发育. 本研究结果也表明,不同复种轮作方式对稻田杂草密度有显著影响,杂草的发生种类和密度均小于连作稻田,对杂草的抑制效果也明显优于连作处理. 这与前人的研究结果较为一致.

3.2 农田环境条件对杂草群落的影响

Derksen 等^[34]和 Swanton 等^[35]研究发现,杂草密度和耕作方式之间并不存在清晰的关系,认为杂草群落的变化更多受地理位置、环境和管理措施的影响. 左小安等^[36]研究表明,群落生境的变化导致群落物种的变化,使不同生活、生态特性的物种在不同群落环境中成为优势种、次优势种和群落生态功能的维持者. 魏守辉等^[37]、郑永华等^[38]研究发现,把鱼、鸭、蛙等物种引入稻田可以有效降低杂草生物

量,使杂草群落的物种多样性降低,改变杂草的群落结构,有利于限制杂草的发生危害。Khalak 等^[39]发现,种植马铃薯时,少量多次灌溉的田间各种杂草生长较差,而多量少次灌溉有利于各种杂草的生长。Olsen 等^[40]研究表明,如果改变杂草上方作物的高度和密度,能够控制杂草的生长发育,从而影响杂草的生物量和作物产量。

上述研究均表明,与不同稻作方式相比,农田环境条件(群落生境的变化、气候、土壤等生态因子^[41])对杂草群落的影响更大,关系更为密切。环境因子的复杂多样性及其与杂草群落的相关性是未来农田杂草群落研究的主要方向之一。本研究探讨了不同水旱轮作复种方式下稻田杂草群落特征及其物种多样性,对我国江南丘陵区双季稻田的杂草综合治理与农业可持续发展有一定的指导意义,但缺乏复种轮作方式对农田系统中杂草群落结构的影响机理研究,相关工作还有待今后进一步开展。

4 结 语

本试验结果表明,不同复种轮作方式对稻田杂草密度有显著影响,杂草的发生种类和密度均小于连作稻田,对杂草的抑制效果也明显优于连作处理,而连作方式下杂草物种多样性指数最高。这可能是因为实行水旱轮作后,杂草的生存环境被改变,杂草物种多样性降低^[21]。轮作系统下 CCSR 处理(紫云英-早稻-晚玉米→紫云英-早玉米间作早大豆-晚稻)物种优势度最低,说明 CCSR 处理在一定程度上能降低优势种杂草的地位,并减轻其危害,但其群落均匀度最低,在生产过程中需要注意一些次要杂草的危害。不同复种轮作方式下基本杂草群落组成为:鸭舌草+稗草+矮慈姑。从 Bray-Curtis 群落相似性指数来看,轮作系统下 3 种复种方式间杂草群落的相似性均较高,其中 CRCS(紫云英-早稻-晚玉米间作晚大豆→紫云英-早玉米-晚稻)与 CCSR 处理的相似度最高,CRR(紫云英-早稻-晚稻→紫云英-早稻-晚稻)与 CRCS 处理的相似度最低。

参考文献

[1] Gao Z-J (高宗军), Li M (李 美), Gao X-X (高兴祥), *et al.* Effects of different tillage on weed communities in winter wheat fields. *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), 2011, **20**(1): 15-21 (in Chinese)

[2] Gu Q-Z (古巧珍), Yang X-Y (杨学云), Sun B-H (孙本华), *et al.* Weed biodiversity in winter wheat field of loess soil under different fertilization regimes. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报),

2007, **18**(5): 1038-1042 (in Chinese)

[3] Reganold JP, Glover JD, Andrews PK, *et al.* Sustainability of three apple production systems. *Nature*, 2001, **410**: 926-930

[4] Maeder P, Fliessbach A, Dubois D, *et al.* Soil fertility and biodiversity in organic farming. *Science*, 2002, **296**: 1694-1697

[5] Niu X-S (牛新胜), Liu M-J (刘美菊), Zhang H-Y (张宏彦), *et al.* Influence of different tillage, straw and nitrogen management on weeds biomass in winter wheat-summer maize rotation systems. *Soil and Fertilizer Sciences in China* (中国土壤与肥料), 2011(6): 49-53 (in Chinese)

[6] Zhou X-G (周小刚). The current situation and prospect of weed science research in China. *Pesticide Market News* (农药市场信息), 2000(2): 13, 24 (in Chinese)

[7] Gan X-W (甘晓伟), Luo S-M (骆世明). Disease, insect pest and weed control of rice production in China by using biodiversity technology. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2008, **27**(5): 853-857 (in Chinese)

[8] Spehn EM, Joshi J, Schmid B, *et al.* Plant diversity effects on soil heterotrophic activity in experimental grassland ecosystems. *Plant and Soil*, 2000, **224**: 217-230

[9] Li L, Zhang FS, Li XL, *et al.* Interspecific facilitation of nutrient uptake by intercropped maize and faba bean. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2003, **65**: 61-71

[10] Wang Q-S (王强盛), Huang P-S (黄丕生), Zhen R-H (甄若宏), *et al.* Effect of rice-duck mutualism on nutrition ecology of paddy field and rice quality. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(4): 639-645 (in Chinese)

[11] Zhang J-E (章家恩), Xu R-B (许荣宝), Quan G-M (全国明), *et al.* Effects of rice-duck farming system on physiological characters of rice. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(9): 1959-1964 (in Chinese)

[12] Zhu YY, Chen HR, Fan JH, *et al.* Genetic diversity and disease control in rice. *Nature*, 2000, **406**: 718-722

[13] Jackson LE, Ramirez I, Yokota R, *et al.* On-farm assessment of organic matter and tillage management on vegetable yield, soil, weeds, pests and economics in California. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2004, **103**: 443-463

[14] Wang H (王 华), Huang H (黄 璜), Yang Z-H (杨志辉), *et al.* Integrated benefits of paddy rice-duck complex ecosystem. *Rural Eco-Environment* (农村生态环境), 2003, **19**(4): 23-26 (in Chinese)

[15] Liu X-Y (刘小燕), Huang H (黄 璜), Yang Z-P (杨治平), *et al.* Methane emission from rice-duck-fish complex ecosystem. *Ecology and Environment* (生态环境), 2006, **15**(2): 265-269 (in Chinese)

[16] Yuan WL, Cao CG, Wang JP. Economic valuation of gas regulation as a service by rice-duck-fish complex ecosystem. *Ecological Economy*, 2008, **4**: 266-272

- [17] Wang H (王 寒), Tang J-J (唐建军), Xie J (谢 坚), *et al.* Controlling effects of multiple species coexistence on rice diseases, pests and weeds in paddy field ecosystem. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(5): 1132–1136 (in Chinese)
- [18] Zhang D (张 丹), Min Q-W (闵庆文), Cheng S-K (成升魁), *et al.* Effects of different rice farming systems on paddy field weed community. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(6): 1603–1608 (in Chinese)
- [19] Wang S-B (王淑彬), Huang G-Q (黄国勤), Huang H-Q (黄海泉), *et al.* Studies on effects of ecology and economy on paddy-upland rotation. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis* (江西农业大学学报), 2002, **24**(6): 757–761 (in Chinese)
- [20] He G-Z (贺广洲), Fan J-X (樊吉详). Study on rice economy fertilization technical parameters. *Anhui Agricultural Science Bulletin* (安徽农学通报), 2009, **15**(1): 56, 89 (in Chinese)
- [21] Li R-H (李儒海), Qiang S (强 胜), Qiu D-S (邱多生), *et al.* Effects of long-term fertilization regimes on weed communities in paddy fields under rice-oilseed rape cropping system. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(7): 3236–3243 (in Chinese)
- [22] Ma K-P (马克平), Liu Y-M (刘玉明). The methods of measuring community biodiversity. I. Measurement of α diversity (Part 2). *Biodiversity Science* (生物多样性), 1994, **2**(4): 231–239 (in Chinese)
- [23] Ma K-P (马克平), Liu C-R (刘灿然), Liu Y-M (刘玉明). The methods of measuring community biodiversity. II. Measurement of β diversity. *Biodiversity Science* (生物多样性), 1995, **3**(1): 38–43 (in Chinese)
- [24] Cardina J, Herms CP, Doohan DJ. Crop rotation and tillage system effects on weed seedbanks. *Weed Science*, 2002, **50**: 448–460
- [25] Shrestha A, Knezevic SZ, Roy RC, *et al.* Effect of tillage, cover crop and crop rotation on the composition of weed flora in a sandy soil. *Weed Research*, 2002, **42**: 76–87
- [26] Zhao Y-Q (赵玉清). Study on the effects of different rotation on evolution of farmland ecological factors and benefit. *Journal of Hebei Agricultural Sciences* (河北农业科学), 1996(3): 27–29 (in Chinese)
- [27] Song X-M (宋兴明). Evaluation of rice paddies multiple cropping, crop rotation effect. *Soil Agrochemical Bulletin* (土壤农化通报), 1996, **11**(1): 35–36 (in Chinese)
- [28] Huang G-Q (黄国勤), Xiong Y-M (熊云明), Qian H-Y (钱海燕), *et al.* Ecological analysis on crop rotation systems of paddy field. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2006, **43**(1): 69–78 (in Chinese)
- [29] Sun X (孙 雪), Lu P-L (卢鹏林), Xin G-R (辛国荣). Effects of planting ryegrass on farmland weeds and seedbank in winter. *Pratacultural Science* (草业科学), 2011, **28**(6): 1035–1040 (in Chinese)
- [30] Wei S-H (魏守辉), Qiang S (强 胜), Ma B (马波). Effects of different crop system on the characteristics of soil weed seed bank. *Chinese Journal of Ecology* (生态学报), 2005, **24**(4): 385–389 (in Chinese)
- [31] Yang R (杨 荣), Su Y-Z (苏永中). Effects of cultivation regimes on weed community structures in newly reclaimed sandy farmlands. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2010, **18**(6): 1218–1222 (in Chinese)
- [32] Tian X-X (田欣欣), Bo C-Y (薄存瑶), Li L (李丽). Effects of different soil tillage systems on weed biodiversity and wheat yield in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) field. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2011, **31**(10): 2768–2775 (in Chinese)
- [33] Légère A, Stevenson FC, Benoit DL. Diversity and assembly of weed communities: Contrasting responses across cropping systems. *Weed Research*, 2005, **45**: 303–315
- [34] Derksen DA, Lafond GP, Thomas AG, *et al.* Impact of agronomic practices on weed communities tillage systems. *Weed Science*, 1993, **41**: 409–417
- [35] Swanton CJ, Shrestha A, Roy RC, *et al.* Effect of tillage systems N and cover crop on the composition of weed flora. *Weed Science*, 1999, **47**: 454–461
- [36] Zuo X-A (左小安), Zhao H-L (赵哈林), Zhao X-Y (赵学勇), *et al.* Species diversity of degraded vegetation in different age restorations in Horqin Sandy Land, Northern China. *Acta Pratacultural Sinica* (草业学报), 2009, **18**(4): 9–16 (in Chinese)
- [37] Wei S-H (魏守辉), Qiang S (强 胜), Ma B (马波), *et al.* Control effects of rice-duck farming and other weed management strategies on weed communities in paddy fields. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(6): 1067–1071 (in Chinese)
- [38] Zheng Y-H (郑永华), Deng G-B (邓国彬), Lu G-M (卢光敏). Economic benefits of rice-fish-duck complex ecosystem: A preliminary study. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 1997, **8**(4): 431–434 (in Chinese)
- [39] Khalak A, Kumaraswamy AS. Weed biomass in relation to irrigation and mulching and economics of mulching potato crop under conditions of acute water scarcity. *Journal of the Indian Potato Association*, 1993, **20**: 185–189
- [40] 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. *Weed Biology and Management*, 2006, **6**: 165–173
- [41] Zhai Z-B (翟中兵), Wu H-Y (吴海亚), Zhang C-D (张丛德), *et al.* The succession of weed communities and comprehensive treatment in direct seeding paddy field with double-free culture of rice-rape rotations. *Anhui Agricultural Science Bulletin* (安徽农学通报), 2010, **16**(16): 92–94 (in Chinese)

作者简介 杨滨娟,女,1985年生,博士研究生.主要从事耕作制度与农业生态研究. E-mail: yangbinjuan27@sina.com

责任编辑 张凤丽