植物营养与肥料学报 2015,21(1): 200 - 210
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2015.0122

施肥模式对晚稻田杂草群落的影响

潘俊峰[1,2], 万开元[1], 李祖章[3], 陶 勇[1], 刘益仁[3], 刘 毅[1], 李志国[1], 张过师[1,4], 陈 防[1,4*]

(1 中国科学院武汉植物园,湖北武汉 430074; 2 安徽农业大学,安徽合肥 230036;
3 江西省农业科学院, 江西南昌 330200; 4 国际植物营养研究所中国项目部, 湖北武汉 430074)

摘要:【目的】长期不合理施化肥对生态环境的影响已经引起学者和公众的关注,有机肥的施用越来越受到重视。揭示有机肥对农田杂草群落影响的机制、预测有机农业环境下杂草群落的演替趋势十分困难。本文对比研究不同施肥模式下农田杂草的群落特征,探索晚稻田杂草群落结构演变趋势,以期为现代农业中有机肥的合理施用和农田生物多样性保护提供科学依据。**【方法】**通过田间长期定位施肥试验,运用群落生态学方法研究了晚稻种植季五种施肥处理区杂草群落的结构特征及其生物多样性。在每个小区随机设置 5 个面积为 0.25 m^2 的样方,记录各样方内杂草物种种类、每个种类杂草的数量,调查杂草的盖度与频度;测定稻谷理论产量;使用照度计测量地表与水稻冠层顶部的光照强度,计算光照透过率;测定耕作层土壤的有机质、碱解氮、有效磷、速效钾含量。计算杂草的重要值,采用物种丰富度(S)和 Shannon-Wiener 指数(H)测定杂草群落的生物多样性;以 15 个处理小区中的 11 种常见杂草的重要值构成原始数据矩阵,应用 SPSS16.0 软件进行主成分分析和典范对应分析。**【结果】**晚稻田不同施肥处理土壤养分以及光照透过率差异显著,施有机肥的处理晚稻稻谷产量高于 CK 与 NPK 纯化肥处理。CK 处理区优势种为野荸荠 - 节节菜 - 异型莎草 - 鸭舌草,NPK 处理区优势种为双穗雀稗,NPK5/5 和 NPK3/7 处理区优势种为双穗雀稗 - 鸭舌草,NPK7/3 处理区优势种为双穗雀稗 - 鸭舌草 - 稗。主成分分析结果表明 15 个施肥处理小区的杂草群落可以分为三大类: 第一类是 CK 处理;第二类是 NPK3/7 处理;第三类是 NPK、NPK5/5、NPK7/3 三个处理。主成分 Factor 1 与有机质、碱解氮以及有效磷呈极显著负相关($P<0.01$),与光照透过率呈极显著正相关($P<0.01$)。典范对应分析结果显示,节节菜、野荸荠与牛毛毡比较适宜生长在 CK 处理区,双穗雀稗适宜在 NPK7/3 处理区生长,鸭舌草、陌上菜以及四叶萍适宜生长在 NPK3/7 处理区。有机肥处理区的物种丰富度与物种多样性指数处于 NPK 与 CK 之间,且随着有机肥比例的增加物种数增加。物种丰富度以及物种多样性指数与有机质、碱解氮以及有效磷呈极显著正的"U 型"相关($P<0.01$),与速效钾呈显著负相关($P<0.05$),与群落光照条件呈极显著正相关($P<0.01$)。**【结论】**晚稻田杂草群落特征与土壤有机质、碱解氮、有效磷含量以及地表光照透过率关系密切。均衡施用有机和无机肥可以显著降低杂草群落的优势种数量,将杂草群落的优势种数量以及生物多样性维持在不施肥与纯施化肥处理区之间。因此,可以通过调整有机肥的施用量来调控农田杂草生长及群落特性,实现农田杂草的科学综合管理。综合考虑晚稻稻谷产量和杂草群落生物多样性状况,NPK3/7(化肥 30% + 有机肥 70%)施肥模式既可以保证作物的优质高产,也可以较好地维持杂草群落的生物多样性。

关键词: 有机肥; 杂草群落; 土壤养分; 生物多样性

中图分类号: S154.1; S315 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2015)01-0200-11

Effect of fertilization patterns on weed community in late rice fields

PAN Jun-feng[1,2], WAN Kai-yuan[1], LI Zu-zhang[3], TAO Yong[1], LIU Yi-ren[3], LIU Yi[1], LI Zhi-guo[1], ZHANG Guo-shi[1,4], CHEN Fang[1,4*]

(*1 Wuhan Botanical Garden, Chinese Academic of Sciences, Wuhan 430074, China; 2 Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 3 Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang 330200, China; 4 China Program of International Plant Nutrition Institute, Wuhan 430074, China*)

收稿日期: 2013-12-31 **接受日期:** 2014-06-27

基金项目: 国际植物营养研究所资助项目(IPNI-HB-34); 湖北省重点实验室开放课题资助。

作者简介: 潘俊峰(1986—), 男, 安徽黄山人, 硕士, 助理研究员, 主要从事植物营养学与农业生态学方面的研究。
E-mail: panjfaau@163.com。 * 通信作者 E-mail: fchen@ipni.ac.cn

Abstract:【**Objectives**】Effect of long-term and unreasonable chemical fertilization on ecological environment has attracted attention of scholars and the public, and application of organic fertilizer is paid more and more attention. It is difficult to reveal mechanism of organic fertilization on weed communities and forecast evolution trend of weed communities under organic farming environment. This paper was to study weed communities under different fertilization patterns in farmlands, and explore evolution trend of weed community structure in late rice fields. 【**Methods**】The weed community structure features and biodiversity of five fertilization treatments in late rice growing season were studied by using the method of community ecology based on a long-term fertilization field experiment. Five quadrats each with 0.25 m^2 area were set in each plot for sampling and investigation, and weed species, numbers, coverage and frequency in the quadrats were recorded and the rice yields were measured. Digital light meters were placed on the soil surface and top of the crop canopy. Soil samples were taken in each plot to analyze organic matter, available N, P and K. The importance values of each weed species in each plot were calculated, and the biodiversity of weeds was measured with the species richness S and Shannon-Wiener index H. Importance values of 11 common weed species in 15 plots were used as original matrix for principal components analysis and canonical correspondence analysis (CCA) by SPSS16.0. 【**Results**】There are significant differences of soil nutrients and light transmittance in late rice fields under the different fertilization patterns. The rice yields in the treatments of combined application of organic manure and chemical fertilizers are higher than those in other treatments. *Heleocharis plantagineiformis*, *Rotala indica*, *Cyperus difformis* and *Monochoria vaginalis* are dominant weed species in the CK treatment. *Paspalum paspaloides* is dominant weed species in the NPK treatment. The weed species in the NPK5/5 and NPK3/7 treatments are dominated by *Paspalum paspaloides* and *Cyperus difformis*. *Paspalum paspaloides*, *Cyperus difformis* and *Echinochloa crusgalli* are dominant weed species in the NPK7/3 treatment. The result of PCA indicates that the 15 weed communities can be divided into three patterns: pattern 1 includes the CK treatment, pattern 2 includes the NPK3/7 fertilization treatment, and pattern 3 includes the NPK, NPK5/5 and NPK7/3 fertilization treatments. The principal component 1 is significantly and negatively correlated with organic matter, available N and P ($P < 0.01$), but is significantly and positively correlated with light transmittance ($P < 0.01$). The result of CCA indicates that *Heleocharis plantagineiformis*, *Rotala indica* and *Heleocharis yokoscensis* are adapted to the CK treatment, *Paspalum paspaloides* is adapt to the NPK7/3 treatment, and *Monochoria vaginalis*, *Lindernia procumbens* and *Marsilea quadrifolia* are adapt to the NPK3/7 treatment. The number of dominant species and biodiversity in the treatments that combined use organic manure and chemical fertilizers were between that in the CK and NPK treatments. There is a trend that the biodiversity is increased with the increase of organic manure proportion. The biodiversity indices of weed community are significant upward parabola correlative with organic matter and available N and P ($P<0.01$), whereas are negatively correlated with available K ($P<0.05$) and significantly and positively correlated with transmittance ($P < 0.01$). 【**Conclusions**】The weed community features are closely related to the contents of soil organic matter, available N, available P and light transmittance. Balanced fertilization significantly reduces the number of dominant weed species. The treatments that combined use organic manure and chemical fertilizers maintain the number of dominant species and biodiversity between the CK and NPK treatments. These results show that the weed community could be regulated by adjusting the application rate of organic manure for realizing the integrated weed management. Considering both the yield of late rice and biodiversity of weed community, the NPK3/7 treatment (chemical fertilizer 30% + organic manure 70%) is not only beneficial to obtain high yield, but also shows an advantage for keeping weed biodiversity.

Key words: organic manure; weed community; soil nutrient; biodiversity

江西水稻种植面积 340×10^4 hm^2,是我国重要的稻谷主产区之一。据中国统计年鉴报道[1],2012年江西省水稻产量为 1950.1 万吨。稻田杂草与作物竞争光、热、水、肥、空间等资源,是制约作物优质高产的重要因素[2-4]。虽然农田杂草可以通过化学除草剂实施防控,但农药残留现象日益突出、杂

草抗药性不断增强[5],已对农业安全生产以及农业生态环境保护产生了不利影响[6]。而且,近年来有研究报道指出,杂草对于农田生态系统功能的正常发挥和维持区域生态平衡等方面有着不可忽视的作用[7-9]。因此,在现代集约化农业生产条件下,如何科学实施稻田杂草防控,在达到水稻高产目标的同时,实现对农田生态系统的重要组成部分—杂草的生物多样性保护就成为必须解决的科学问题。

长期不合理的化肥施用对生态环境的影响已经引起学者和公众的关注,与此同时,秸秆还田、绿肥种植和有机肥施用等环境友好型作物生产技术正越来越受到重视[10],这些措施可以明显改善土壤理化性质和农田小气候[11],影响杂草与作物或杂草与杂草间的竞争关系,进而影响农田杂草的生物多样性[7,12],对农田杂草群落产生明显影响[13]。有研究发现,长期秸秆还田和有机肥施用对冬闲田冬春季杂草群落的调控效应显著,而且效应的强弱与施用时期和方式密切相关[10];氮磷钾与有机肥配施模式下种植绿肥能够促进冬季杂草生长,同时对春季杂草有明显的抑制作用,杂草生物量显著降低[14];平衡施用氮、磷、钾肥,并配合施用有机肥(猪粪和秸秆),不仅有利于促进作物的生长,保持农田生态系统中一定水平的杂草生物多样性,也降低了某些优势杂草在群落中的优势地位[8]。

研究指出,平衡施用氮、磷、钾肥料,并配合施用有机肥被认为是科学合理的施肥方式,是兼顾田间杂草危害控制、作物产量提高和杂草物种多样性保护的有效措施[8,15-16]。但是关于不同有机-无机肥配施比例下晚稻农田杂草群落的研究鲜有报道。研究不同有机-无机肥配施比例下农田杂草群落演变规律,对于揭示有机肥对农田杂草群落的作用机制、科学预测现代有机农业环境下杂草群落的演替,推荐合理的施肥模式具有极为重要的指导意义。为此,本研究选择以江西省农田土壤肥力长期定位监测试验田晚稻种植季的杂草群落为对象,对比研究不同施肥模式,尤其是关注有机-无机肥不同配施比例下农田杂草群落特征,以明确晚稻田杂草群落结构演变趋势,为现代农业有机肥的合理施用和农田生物多样性的保护提供科学依据和技术参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于江西省南昌县江西省农业科学院试验场,田间试验布设在农田土壤肥力长期定位监测试验点。该地处于中亚热带,年平均气温17.5 ℃,≥10 ℃积温5400 ℃,年降水量1600 mm,年蒸发量1800 mm,无霜期约280 d。试验自1984年早稻开始,采用早稻—晚稻连作后冬季休闲的种植制度。供试土壤为第四纪亚红粘土(即莲塘层)母质上发育的中潴黄泥田,土壤肥力中等偏下,缺钾比较严重。试验开始前耕层(0—20 cm)土壤有机质含量25.6 g/kg,全氮1.36 g/kg,碱解氮81.6 mg/kg,全磷0.49 g/kg,有效磷20.8 mg/kg,缓效钾240 mg/kg,速效钾35.0 mg/kg;pH为6.50,

1.2 试验设计

田间试验共设5个处理:1)不施肥(CK);2)化肥30%+有机肥70%(NPK3/7);3)化肥50%+有机肥50%(NPK5/5);4)化肥70%+有机肥30%(NPK7/3);5)氮磷钾化肥(NPK),其中,处理2、3、4与处理5的养分量相等。早稻施N 150 kg/hm^2、P_2O_5 60 kg/hm^2、K_2O 150 kg/hm^2,晚稻施N 180 kg/hm^2、$P_2O_5$60 kg/hm^2、K_2O 150 kg/hm^2。氮肥用尿素(含N 46%),磷肥用过磷酸钙(含P_2O_5 12%),钾肥用氯化钾(含K_2O 60%);早稻种植季有机肥采用紫云英,其养分含量按照N 0.30%、$P_2O_5$0.08%、K_2O 0.23%计算;晚稻种植季采用鲜猪粪,其养分含量按照N 0.45%、$P_2O_5$0.19%、K_2O 0.35%计算,具体施肥量详见表1。其中,磷肥和有机肥全部作基肥;氮肥50%作基肥,25%在分蘖期、25%在幼穗分化期追施;钾肥全作追肥,其中50%在分蘖期、50%在幼穗分化期追施。试验小区面积33.3 m^2,3次重复,随机区组排列。试验期间分别在早稻季和晚稻季水稻幼苗期人工除草一次。

1.3 测定项目和方法

杂草调查工作于2009年9月下旬开始,此时杂草处于花果期,水稻处于灌浆期。每小区随机设置5个样方,每个样方面积为0.25 m^2(0.5 m×0.5 m)。记录各样方内所有的杂草物种种类、每个种类杂草数量,调查杂草的盖度与频度;同时,记录样方内水稻穴数、有效穗数,并随机选取有代表性的晚稻植株5株带回实验室考种,计算稻谷理论产量。使用照度计(型号T-1H)测定地表与水稻冠层顶部的光照强度,计算光照透过率。

采集耕层(0—20 cm)土壤样品,在实验室经风干、过筛备用。土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法;碱解氮采用NaOH浸提—H_2SO_4滴定法;有效磷采用Olsen法;速效钾采用1 mol/L的醋酸铵溶液浸提—火焰光度计法测定[17]。

表 1　不同施肥模式下的肥料用量(kg/hm^2)

Table 1　Proportions of the total amount of fertilizer in fields under different fertilization patterns

处理 Treatments	肥料 Fertilizer	早稻 Early rice	晚稻 Late rice
CK	尿素 Urea	0	0
	过磷酸钙 Superphosphate	0	0
	硫酸钾 Potassium sulfate	0	0
	有机肥 Organic fertilizer	0	0
NPK3/7	尿素 Urea	98	117
	过磷酸钙 Superphosphate	267	57
	硫酸钾 Potassium sulfate	116	87
	有机肥 Organic fertilizer	35000	28000
NPK5/5	尿素 Urea	163	196
	过磷酸钙 Superphosphate	333	183
	硫酸钾 Potassium sulfate	154	133
	有机肥 Organic fertilizer	25000	20000
NPK7/3	尿素 Urea	228	274
	过磷酸钙 Superphosphate	400	310
	硫酸钾 Potassium sulfate	193	180
	有机肥 Organic fertilizer	15000	12000
NPK	尿素 Urea	326	392
	过磷酸钙 Superphosphate	500	500
	硫酸钾 Potassium sulfate	250	250
	有机肥 Organic fertilizer	0	0

1.4　数据处理

根据各样点调查数据按照下列公式计算不同杂草的重要值 IV:

$$IV = (RC + RA + RF)/3 \qquad [1]$$ [18]

式中: RC 表示相对盖度,即某杂草的盖度占样方中所有杂草盖度的比例;RA 表示相对多度,即指某杂草的多度占样方中所有杂草多度的比例;RF 为相对频度,指某杂草的频度占所有杂草频度的比例。

杂草的生物多样性采用物种丰富度 S(即样方中包含的所有杂草种类数)和物种多样性指数 H(即田间杂草物种丰富度和物种均匀度的综合量的 Shannon-Wiener 指数 H)表示。

$$H = -\sum P_i \cdot \ln P_i \qquad [2]$$ [19]

式中: $P_i = N_i/N$, N_i 为样方中第 i 物种的个体数, N 为样方总个体数。

以 15 个处理小区中的 11 种常见杂草的重要值构成原始数据矩阵,应用 SPSS 16.0 软件进行主成分分析,以分析所得的前两个主分量及其特征值计算 15 个小区的前两个主向量,以此作 15 个施肥处理小区的散点图[20]。以 5 种处理土壤中的 11 种常见杂草的重要值构成原始数据矩阵,应用 SPSS16.0 软件进行典范对应分析,以每种杂草的前两个主分量作杂草的二维散点图,并在图上标出 5 个施肥处理的中心位置,连接原点与杂草位置成一直线,用这些点和直线来表示杂草与施肥处理之间的关系: 杂草与某施肥处理的中心点越靠近,且直线越长,则表示这种杂草越适宜在这种施肥处理下生长[21]。

试验数据采用 Excel 2010 和 SPSS 16.0 进行处理和统计分析。

2　结果与分析

2.1　晚稻田杂草的生长环境与产量

从表 2 可以看出,晚稻田的不同施肥处理土壤养分以及光照透过率差异显著。土壤有机质、碱解氮以及有效磷含量的变化趋势一致, CK 处理区显著低于其他处理区($P < 0.05$),NPK3/7 处理显著高于其他处理($P < 0.05$),有机肥处理区显著高于 CK 与 NPK 纯化肥处理区($P < 0.05$),且随着有机肥比例的增加,有机质含量呈增加的趋势。土壤速效钾含量 CK 处理区显著低于其他处理区($P < 0.05$),NPK 纯化肥处理区显著高于其他处理区($P < 0.05$),施有机肥处理的速效钾含量处于 CK 与 NPK 纯化肥处理区之间。光照透过率在 CK 处理区显著大于其他处理区($P < 0.05$),NPK 处理区显著低于其他处理($P < 0.05$),施有机肥处理区处于 CK 与 NPK 纯化肥处理区之间,NPK3/7 与 NPK7/3 处理显著低于 NPK5/5 处理($P < 0.05$)。晚稻稻谷产量在 NPK7/3 处理显著高于其他处理($P < 0.05$),CK 处理显著低于其他处理($P < 0.05$),施有机肥处理区高于 CK 与 NPK 纯化肥处理区。

2.2　晚稻田杂草群落的物种组成

表 3 结果显示,本次试验调查共发现 11 种杂草。其中,牛毛毡(*Heleocharis yokoscensis*)只在 CK 处理区生长,丁香蓼(*Ludwigia prostrata*)只在 NPK7/3 处理区中不生长,陌上菜(*Lindernia procumbens*)、节节菜(*Rotala indica*)、鸭舌草(*Monochoria vaginalis*)、稗(*Echinochloa crusgalli*)、双穗雀稗(*Paspalum paspaloides*)、异型莎草(*Cyperus difformis*)等六种杂草在五个施肥处理区

均有生长。野荸荠(*Heleocharis plantagineiformis*)、节节菜在CK处理区显著大于其他处理区($P<0.05$);施用有机肥处理区的鸭舌草重要值大于CK与NPK处理区,双穗雀稗的重要值随着有机肥比例的增加而降低,且在NPK处理区显著高于其他处理($P<0.05$);异型莎草在CK处理区显著高于其他施肥处理区($P<0.05$)。

表2 不同施肥模式下晚稻田的土壤养分、透光率以及晚稻产量

Table 2 Soil nutrients, light transmittance and yield of late rice in fields under different fertilization patterns

处理 Treatment	有机质 Organic matters (g/kg)	碱解氮 Available N (mg/kg)	有效磷 Available P (mg/kg)	速效钾 Available K (mg/kg)	透光率 Light transmittance (%)	晚稻产量 Late rice yield (kg/hm^2)
CK	20.2±0.35 d	88.7±0.67 e	5.9±0.70 e	32.3±1.12 e	19.3±0.79 a	4615±415 d
NPK3/7	36.1±0.89 a	172.2±1.06 a	93.4±0.75 a	49.5±0.57 b	6.1±0.40 c	6812±473 b
NPK5/5	32.7±0.91 b	143.1±0.66 b	82.3±1.14 b	38.3±0.42 d	10.9±0.44 b	6558±551 bc
NPK7/3	32.0±0.31 b	137.1±0.21 c	69.2±0.80 c	40.7±0.36 c	6.2±0.56 c	7153±289 a
NPK	26.0±0.35 c	127.4±0.91 d	51.9±0.31 d	62.0±0.75 a	4.9±0.36 d	6388±450 c

注(Note):同列数据后不同小写字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different small letters in same column mean significant at the 5% level.

不同施肥处理间的杂草群落优势种组成差异明显。在CK处理区以野荸荠-节节菜-异型莎草-鸭舌草为优势种,在NPK纯化肥处理区以双穗雀稗占据优势地位,在NPK5/5和NPK3/7处理区双穗雀稗-鸭舌草为优势种组成,NPK7/3处理区优势种组成为双穗雀稗-鸭舌草-稗。可以看出,与CK处理比较,施肥降低了杂草群落的优势种数,尤其是NPK纯化肥处理区优势种结构单一,而配施有机肥的优势种数维持在CK与NPK处理区之间。

2.3 主成分分析与典范对应分析结果

以15个处理小区中的11种常见杂草的重要值构成原始数据矩阵进行主成分分析,15个处理小区杂草群落的Factor 1与Factor 2的方差累积为69.88%(图1)。15个施肥处理小区的杂草群落可以分为三大类:第一类是CK处理的3个小区,主要集中在Factor 2的右侧;第二类是NPK3/7处理的3个小区,主要集中在第二象限;第三类是NPK、NPK5/5、NPK7/3三个处理九个小区,主要集中在第三象限。主成分Factor 1与有机质、碱解氮以及有效磷呈显著负相关($P<0.01$),与光照透过率呈极显著正相关($P<0.01$)(图2),Factor 2与有机质、碱解氮、有效磷、速效钾以及光照透过率均无显著相关性。结果表明,有机质、碱解氮、有效磷以及光照透过率影响杂草群落的物种组成。

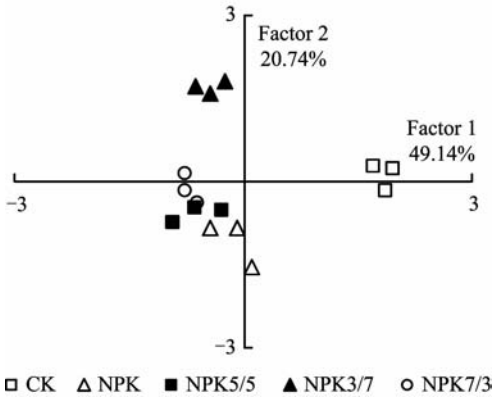

图1 15个施肥处理小区杂草群落的主成分分析

Fig. 1 PCA ordination diagram of weed community in 15 fertilization treatment plots

以15个处理小区中的11种常见杂草的重要值构成原始数据矩阵进行典范对应分析,15个处理小区杂草群落的Factor 1与Factor 2的方差累积为86.06%(图3),比较每种杂草与施肥处理的直线距离。结果显示:NPK5/5与NPK3/7处理的杂草群落联系紧密,分别与CK、NPK以及NPK7/3等三个处理独立分布在不同象限。其中,节节菜、野荸荠与牛毛毡比较适宜生长在CK处理区,双穗雀稗适宜在NPK7/3处理区生长,鸭舌草、陌上菜以及四叶萍适宜生长在NPK3/7处理区。

表 3　不同施肥模式下晚稻田杂草物种组成

Table 3　Weed community species composition under different fertilization patterns

处理 Treatment	盖度(%) Coverage	密度(No./m^2) Density	频度 (%) Frequency	重要值(%) Important values
		牛毛毡 *Heleocharis yokoscensis*		
CK	4.3 ±0.58 a	57.0 ±10.54 a	40.0 ±34.64 a	0.1 ±0.03 a
NPK3/7	/	/	/	/
NPK5/5	/	/	/	/
NPK7/3	/	/	/	/
NPK	/	/	/	/
		丁香蓼 *Ludwigia prostrata*		
CK	2.2 ±2.03 a	2.9 ±2.81 a	26.7 ±23.09 a	0.1 ±0.02 a
NPK3/7	1.0 ±1.38 ab	1.3 ±0.92 ab	26.7 ±11.55 a	0.1 ±0.03 a
NPK5/5	0.8 ±0.61 ab	1.1 ±0.46 ab	26.7 ±11.55 a	0.1 ±0.03 a
NPK7/3	/	/	/	/
NPK	0.3 ±0.58 ab	0.3 ±0.46 b	6.7 ±11.55 ab	0.1 ±0.02 a
		陌上菜 *Lindernia procumbens*		
CK	0.1 ±0.12 b	1.1 ±0.92 b	13.3 ±11.55 b	0.1 ±0.01 c
NPK3/7	2.3 ±0.42 a	11.3 ±2.84 a	46.7 ±46.19 ab	0.1 ±0.03 ab
NPK5/5	1.9 ±0.59 a	12.8 ±1.33 a	73.3 ±30.55 a	0.1 ±0.01 a
NPK7/3	0.7 ±0.95 b	5.9 ±0.46 b	40.0 ±20.00 ab	0.1 ±0.01 ab
NPK	0.4 ±0.64 b	2.7 ±4.62 b	20.0 ±34.64 b	0.1 ±0.06 bc
		节节菜 *Rotala indica*		
CK	11.9 ±1.15 a	112.3 ±8.09 a	80.0 ±34.64 a	0.2 ±0.02 a
NPK3/7	2.3 ±0.42 b	11.3 ±2.84 b	46.7 ±46.19 ab	0.1 ±0.03 b
NPK5/5	0.7 ±0.46 c	5.3 ±4.41 bc	20.0 ±200.01 b	0.1 ±0.03 c
NPK7/3	0.2 ±0.21 c	1.6 ±1.60 c	13.3 ±11.55 b	0.1 ±0.02 c
NPK	0.2 ±0.01 c	0.8 ±0.01 c	20.0 ±0.01 b	0.1 ±0.01 c
		鸭舌草 *Monochoia vaginalis*		
CK	14.6 ±4.76 ab	30.4 ±6.94 a	86.7 ±23.09 a	0.2 ±0.02 c
NPK3/7	17.9 ±2.61 a	27.2 ±1.60 a	93.3 ±11.55 a	0.3 ±0.02 a
NPK5/5	8.5 ±2.54 bc	12.0 ±2.88 b	100.0 ±0.01 a	0.2 ±0.05 bc
NPK7/3	11.3 ±4.70 abc	8.8 ±1.55 b	73.3 ±30.55 a	0.2 ±0.04 b
NPK	4.3 ±0.83 c	5.9 ±1.10 b	60.0 ±34.64 a	0.1 ±0.04 c
		稗 *Echinochloa crusgalli*		
CK	0.4 ±0.01 d	0.8 ±0.01 c	20.0 ±0.01 c	0.1 ±0.01 d
NPK3/7	5.8 ±1.31 a	12.8 ±3.46 a	60.0 ±34.64 ab	0.1 ±0.04 ab
NPK5/5	3.4 ±1.25 bc	7.7 ±4.03 ab	63.3 ±20.83 a	0.1 ±0.05 bc
NPK7/3	4.2 ±0.69 ab	11.5 ±2.44 a	80.0 ±0.01 a	0.2 ±0.02 a
NPK	1.5 ±1.29 cd	3.2 ±2.88 bc	26.7 ±11.55 bc	0.1 ±0.03 cd

续表 3 Table 3 Continuous

处理 Treatment	盖度(%) Coverage	密度(No./m^2) Density	频度(%) Frequency	重要值(%) Important values
		双穗雀稗 *Paspalum distichum*		
CK	2.7 ± 2.01 c	13.6 ± 10.46 c	53.3 ± 11.55 c	0.1 ± 0.03 d
NPK3/7	6.9 ± 0.70 c	48.0 ± 22.87 b	80.0 ± 0.01 b	0.3 ± 0.05 c
NPK5/5	15.0 ± 5.55 b	70.1 ± 23.90 b	93.3 ± 11.55 ab	0.5 ± 0.12 b
NPK7/3	16.3 ± 1.53 ab	63.7 ± 24.58 b	100.0 ± 0.01 a	0.5 ± 0.04 b
NPK	22.1 ± 1.75 a	105.3 ± 12.40 a	100.0 ± 0.01 a	0.7 ± 0.09 a
		异型莎草 *Cyperus difformis*		
CK	10.3 ± 2.47 a	75.7 ± 21.31 a	100.0 ± 0.01 a	0.2 ± 0.02 a
NPK3/7	1.7 ± 0.31 b	8.8 ± 1.60 b	46.7 ± 46.19 b	0.1 ± 0.02 b
NPK5/5	1.7 ± 0.76 b	8.5 ± 2.39 b	53.3 ± 30.55 ab	0.1 ± 0.02 b
NPK7/3	0.2 ± 0.20 b	1.1 ± 0.46 b	20.0 ± 0.01 b	0.1 ± 0.01 c
NPK	0.1 ± 0.12 b	0.5 ± 0.92 b	13.3 ± 23.09 b	0.1 ± 0.03 c
		野荸荠 *Heleocharis plantagineiformis*		
CK	15.7 ± 3.79 a	112.5 ± 53.35 a	86.7 ± 23.09 a	0.2 ± 0.07 a
NPK3/7	0.4 ± 0.53 b	2.7 ± 3.97 b	13.3 ± 11.55 b	0.1 ± 0.02 b
NPK5/5	/	/	/	/
NPK7/3	/	/	/	/
NPK	/	/	/	/
		四叶萍 *Marsilea quadrifolia*		
CK	2.3 ± 0.36 a	5.6 ± 0.80 b	26.7 ± 11.55 a	0.1 ± 0.01 b
NPK3/7	1.5 ± 0.70 b	8.0 ± 1.37 a	33.3 ± 11.55 a	0.1 ± 0.01 a
NPK5/5	/	/	/	/
NPK7/3	/	/	/	/
NPK	/	/	/	/
		水竹叶 *Mllrdannia triguetra*		
CK	1.1 ± 1.03 a	3.5 ± 3.23 a	26.7 ± 30.55 ab	0.1 ± 0.02 ab
NPK3/7	/	/	/	/
NPK5/5	1.3 ± 0.42 a	3.7 ± 1.67 a	33.3 ± 23.09 a	0.1 ± 0.04 a
NPK7/3	/	/	/	/
NPK	/	/	/	/

注(Note):"/"表示杂草在处理区没有出现"/" indicates the weed species was not found in the plot. 同列数据后不同小写字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different small letters in same column mean significant at the 5% level.

2.4　杂草群落的生物多样性

由表 4 可以看出,不同施肥处理间杂草群落的生物多样性指数差异明显。从杂草种类(物种丰富度 S)水平上看,CK 处理区显著高于其他施肥处理区($P<0.05$),NPK 处理区最低,有机肥处理区处于 NPK 与 CK 之间,且随着有机肥比例的增加物种数增加;从物种多样性指数(H)上看,CK 处理显著高于其他施肥处理($P<0.05$),NPK 处理显著低于其他施肥处理($P<0.05$),有机肥处理处于 NPK 与 CK 之间,且随着有机肥比例的增加而增加。

生物多样性指数与土壤养分、田间光照透过率的相关性分析(图 4、图 5)结果表明,物种丰富度与有机质、碱解氮以及有效磷呈极显著的正“U 型”相关($P<0.01$),与速效钾呈显著负相关($P<0.05$),与群落光照条件极显著正相关($P<0.01$)。物种多样性指数与有机质、碱解氮、有效磷呈极显著正“U 型”相关($P<0.01$),与速效钾极显著负相关($P<0.01$),与群落光照条件极显著正相关($P<0.01$)。

表 4　不同施肥模式下杂草群落生物多样性

Table 4　Biodiversity of weed community under different fertilization patterns

处理 Treatment	物种丰富度(S) Species richness	物种多样性(H) Shannon-Wiener
CK	10.0 ± 1.00 a	2.0 ± 0.10 a
NPK3/7	8.7 ± 0.58 ab	1.9 ± 0.04 ab
NPK5/5	8.0 ± 0.00 b	1.7 ± 0.08 b
NPK7/3	5.7 ± 0.58 c	1.3 ± 0.07 c
NPK	5.0 ± 1.00 c	1.0 ± 0.23 d

注(Note)：同列数据后不同小写字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different small letters in same column mean significant at the 5% level.

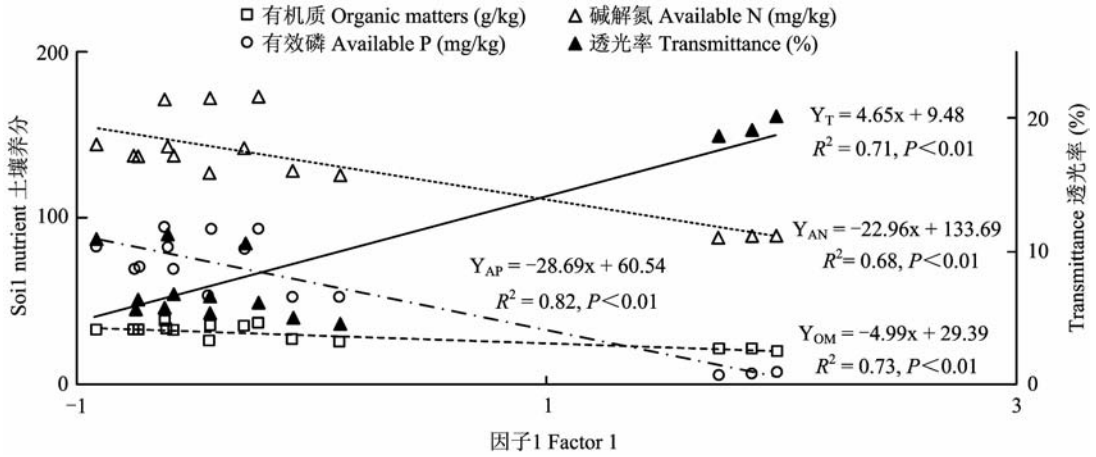

图 2　Factor 1 与土壤养分和透光率的相关性

Fig. 2　Correlations between the principal component analysis Factor 1 and soil nutrients and light transmittance

3　讨论

本研究发现均衡施肥可显著降低水田杂草群落的优势种数量和杂草物种数,这与作者在旱地小麦田的研究结果一致[22]。土壤养分以及光照状况的改变必然影响杂草的生长[23]。而均衡施肥又可以改善土壤养分条件,增强水稻对杂草的竞争能力,降低田间光照透过率,限制杂草的生长。NPK 纯化肥处理区优势种结构单一,杂草物种数明显低于其他施肥处理。推测该施肥处理可能对禾本科植物生长具有很强的促进作用,既提高水稻对杂草的竞争能力,也对禾本科杂草双穗雀稗的生长具有促进作用,影响其他种类杂草的生长,从而导致 NPK 纯化肥处理区田间杂草优势物种组成的单一化和杂草物种数的降低。长期有机－无机配施处理区的优势种数和杂草物种数维持在 CK 与 NPK 处理区之间。杂草物种数与速效钾呈显著负相关($P<0.05$)(图 4),与群落光照条件呈极显著正相关($P<0.01$)(图 5),而该类处理区土壤速效钾含量与光照透过率均处于 CK 与 NPK 处理区之间,从而导致有机－无机配施处理区杂草物种数处于 CK 与 NPK 处理区之间。光照状况又是限制杂草生长的重要因子[23],长期有机－无机配施处理区光照透过率显著高于 NPK 纯化肥处理区($P<0.05$),是促进杂草群落物种多元化组成的重要原因。

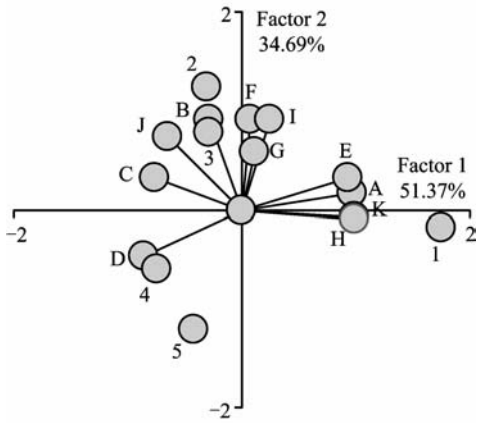

图3 11种杂草与5种施肥模式的典范对应分析

Fig. 3 Canonical correspondence analysis of 11 weed species and 5 fertilization patterns

[注(Note): A—节节菜 *Rotala indica*; B—鸭舌草 *Monochoia vaginalis*; C—稗 *Echinochloa crusgalli*; D—双穗雀稗 *Paspalum distichum*; E—异型莎草 *Cyperus difformis*; F—四叶萍 *Marsilea quadrifolia*; G—水竹叶 *Mllrdannia triguetra*; H—野荸荠 *Heleocharis plantagineiformis*; I—丁香蓼 *Ludwigia prostrata*; J—陌上菜 *Lindernia procumbens*; K—牛毛毡 *Heleocharis yokoscensis*. 1—CK; 2—NPK3/7; 3—NPK5/5; 4—NPK7/3; 5—NPK.]

生物多样性指数(物种丰富度、物种多样性指数)与有机质、碱解氮以及有效磷呈极显著正"U型"相关($P<0.01$),即在有机质含量为20～40 g/kg,碱解氮含量为80～180 mg/kg,有效磷含量为0～100 mg/kg范围时,低养分或者高养分状况均会提高杂草群落的生物多样性。在低养分条件的CK处理区,水稻生长受抑制,田间光照透过率较高,而可以适应低养分条件的杂草却生长较好,导致杂草物种数和物种多样性指数相对较高。在高养分条件的有机-无机配施处理区,田间光照透过率低于CK处理区,造成物种数低于CK处理区,但该类处理区的养分状况明显较好于CK处理区,各物种杂草分布相对较为均匀,导致物种多样性指数升高。处于中等养分条件的是纯化肥处理区,水稻生长旺盛,田间光照透过率显著低于其他施肥处理区,只有对低光照条件有着较强适应能力的杂草物种才可以生长较好,造成杂草物种数相对较低,杂草群落分布不均匀,导致杂草群落多样性指数相对较低。

本研究发现莎草科野荸荠和牛毛毡比较适宜生

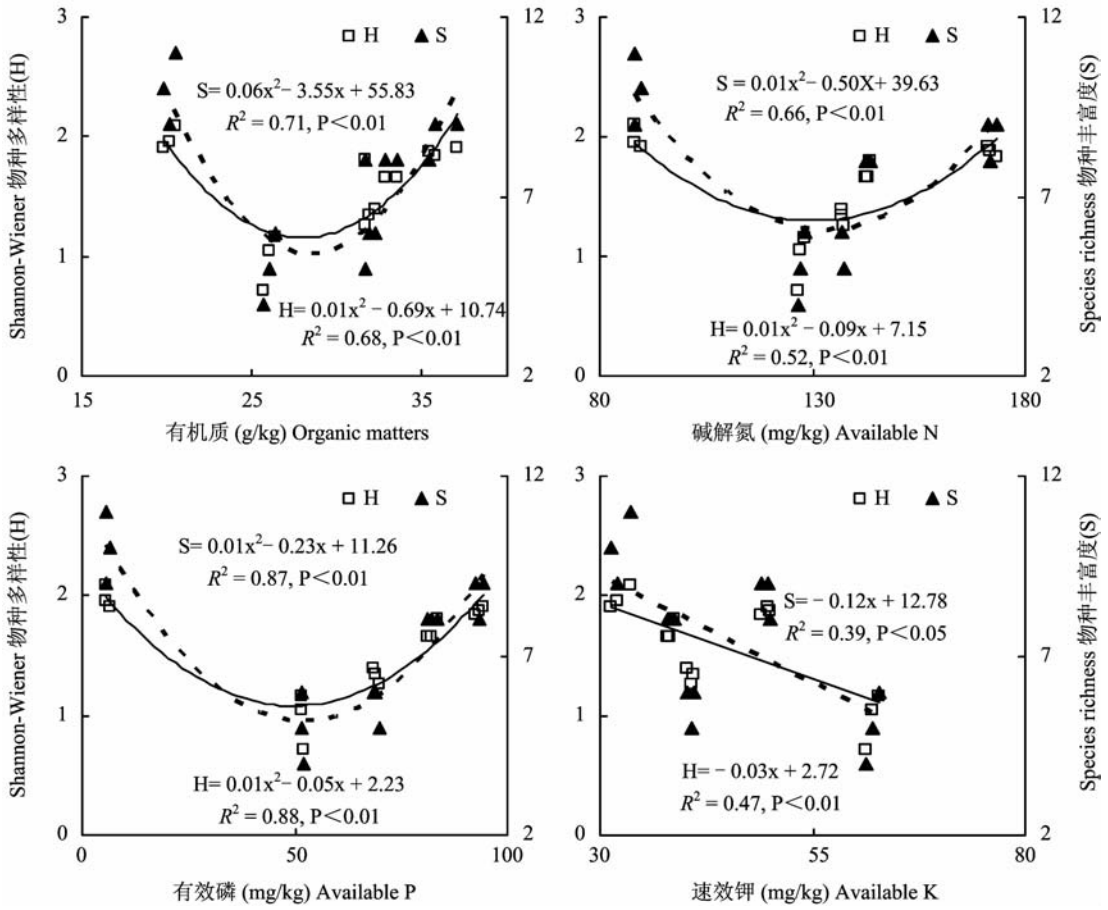

图4 生物多样性与土壤养分的相关性

Fig. 4 Correlations between biodiversity and soil nutrients

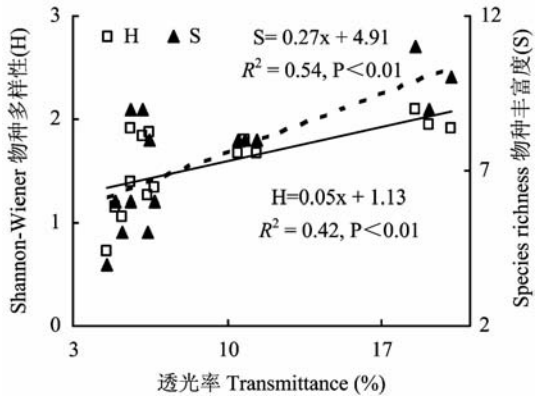

图 5　生物多样性与透光率的相关性

Fig. 5　Correlations between biodiversity and light transmittance

长在不施肥处理区,这与李儒海等[8]、程传鹏等[16]研究结果一致。他们认为莎草科的某些杂草可以很好地适应长期低养分条件。然而,笔者认为该现象的产生不仅仅是因为杂草自身可以很好地适应长期低养分条件,而且可能与其所在的环境也关系密切。杂草的生长不仅与土壤养分含量相关,而且田间地面小环境(如光照条件、土壤微生物等)也影响杂草的生长。莎草科野荸荠与牛毛毡等比较适宜生长在不施肥处理区,可能是其在稻田生境中能很好地适应长期低养分条件;也可能是野荸荠与牛毛毡较其他杂草更需要较好的光照条件,或者土壤微生物的影响等等。因此,需要进一步的试验来解释杂草的这种适应性。

以往多数学者关注研究肥料种类对杂草群落的影响[2,8,24],很少涉及有机肥施用比例的作用,只有尹力初等[23]比较了两个有机肥施用水平对杂草群落的影响,他们的研究表明,在全施有机肥的处理区杂草群落生物多样性高于有机肥和化肥各占一半的施肥处理区。本研究首次发现长期均衡施肥模式下杂草群落物种多样性随着有机肥比例的增加而增加的趋势。笔者分析认为,一方面随着化肥施用比例的下降,土壤养分对当季水稻的促进作用也呈下降的趋势(表 2),在一定程度上水稻对杂草的竞争能力也呈现降低的趋势,较多种类的杂草种子就有机会萌发、生长,最终形成多样化的杂草群落。另一方面,随着有机肥比例的增加土壤有机质含量也呈增高的趋势。而土壤有机质不仅可以改善土壤物理性质,提升土壤养分供应能力,还可以增加土壤微生物量与活性[16]。从这个角度看,或许土壤有机质含量的增加可以提高杂草的竞争能力,导致随着有机肥比例的增加而杂草群落生物多样性呈增加趋势的现象。

4　结论

长期不同有机肥料及氮磷钾肥搭配的施肥模式可以显著影响晚稻田杂草群落的物种组成,杂草群落特征与土壤有机质、碱解氮、有效磷含量以及地表光照透过率关系密切。与不施肥的处理相比,均衡施用有机和化肥可以显著降低杂草群落的优势种数量,将杂草群落的优势种数量以及生物多样性维持在不施肥与纯化肥处理区之间。因此,本研究认为可以通过调整有机肥的施用量来调控农田杂草生长及群落特性,实现农田杂草的科学综合管理。综合考虑晚稻稻谷产量和杂草群落生物多样性状况,本研究认为 NPK3/7(化肥 30% + 有机肥 70%)的施肥模式既可以保证作物的优质高产,也可以较好地维持杂草群落的生物多样性。

参 考 文 献:

[1]　盛来运. 中国统计年鉴—2013 [M/OL]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2013/indexce.htm
Sheng L Y. China statistical yearbook-2013 [M/OL]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2013/indexce.htm

[2]　古巧珍, 杨学云, 孙本华, 等. 不同施肥条件下黄土麦地杂草生物多样性[J]. 应用生态学报, 2007,18(5): 1038-1042.
Gu Q Z, Yang X Y, Sun B H *et al*. Weed biodiversity in winter wheat field of loess soil under different fertilization regimes[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(5): 1038-1042.

[3]　李扬汉. 中国杂草志[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 1-32.
Li Y H. Weed in China [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998. 1-32.

[4]　Thomas A G, Légère A, Leeson J Y *et al*. Weed community response to contrasting integrated weed management systems for cool dry land annual crops[J]. Weed Research, 2011, 51(1): 41-50.

[5]　张朝贤, 钱益新, 胡祥恩. 农田化学除草与可持续发展农业[J]. 农药, 1998, 37(4): 8-12.
Zhang C X, Qian Y X, Hu X E. Chemical weed control in crop fields in relation to sustainable agriculture in China [J]. Pesticides, 1998, 37(4): 8-12

[6]　张壬午, 张洪生, 张汝安. 中国环境保护与农业可持续发展[M]. 北京: 北京出版社, 2001. 183-234.
Zhang R W, Zhang H S, Zhang R A. Environmental protection and sustainable development of agriculture in China[M]. Beijing: Beijing Press, 2001. 183-234.

[7]　陈欣, 王兆赛. 农业生态系统杂草多样性保持的生态学功能[J]. 生态学杂志, 2000, 19(4): 50-52.
Cheng X, Wang Z S. The ecological functions of weed biodiversity

in agro-ecosystem[J]. Chinese Journal of Ecology, 2000, 19(4): 50-52.

[8] 李儒海, 强胜, 邱多生. 等. 长期不同施肥方式对稻油轮作制水稻田杂草群落的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(7): 3236-3243.
Li R H, Qiang S, Qiu D S *et al*. Effects of long-term fertilization regimes on weed communities in paddy fields under rice-oilseed rape cropping system[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(7): 3236-3243.

[9] 万开元, 潘俊峰, 陶勇. 等. 长期施肥对农田杂草的影响及其适应性进化研究进展[J]. 生态学杂志, 2012, 31(11): 2943-2949.
Wan K Y, Pan J F, Tao Y *et al*. Research advances in weed community and its adaptive evolution in croplands as affected by long-term fertilization[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(11): 2943-2949.

[10] 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*. The long-term effects of returning straw and applying organic fertilizer on weed communities in a paddy field of a double rice cropping system [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2009, 18(3): 142-147.

[11] 洪春来, 魏幼璋, 黄锦法. 等. 秸秆全量直接还田对土壤肥力及农田生态环境的影响研究[J]. 浙江大学学报, 2003, 29(6): 627-633.
Hong C L, Wei Y Z, Huang J F *et al*. Effects of total crop straw return on soil fertility and field ecological environment [J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Science), 2003, 29(6): 627-633.

[12] Buhler D D. Implications of weed seed bank dynamics to weed management[J]. Weed Science, 1997, 45: 329-336.

[13] 郭宪, 金玉美, 连海明, 等. 麦秸覆盖对杂草萌发及玉米产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(9): 2584-2596.
Guo X, Jin Y M, Lian H M *et al*. Effect of wheat stalk covering on weed germination and yield of summer corn[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2007, 35(9): 2584-2596.

[14] 赵锋, 董文军, 芮雯奕, 等. 不同施肥模式对南方红壤稻田冬春杂草群落特征的影响[J]. 杂草科学, 2009, (1): 7-12.
Zhao F, Dong W J, Rui W Y *et al*. The effects of different fertilization patterns on winter-spring weed community under reddish paddy fields in South[J]. Weed Science, 2009, (1): 7-12.

[15] Smith R G, Mortensen D A, Ryan M R. A new hypothesis for the functional role of diversity in mediating resource pools and weed-crop competition in agro-ecosystems[J]. Weed Research, 2009, 50: 37-48

[16] 程传鹏, 崔佰慧, 汤雷雷, 等. 长期不同施肥模式对杂草群落及早稻产量的影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(11): 2944-2952.
Cheng C P, Cui B H, Tang L L *et al*. Effects of long-term fertilization regimes on weed community and early rice yield[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(11): 2944-2952.

[17] 鲍士旦. 土壤农化分析 (3 版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 30-106.
Bao S D. Analysis method for soil agro-chemistry [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. 30-106.

[18] 赵淑清, 方精云, 宗占江, 等. 长白山北坡植物群落组成、结构及物种多样性的垂直分布[J]. 生物多样性, 2004, 12(1): 164-173.
Zhao S Q, Fang J Y, Zhong Z J *et al*. Composition, structure and species diversity of plant communities along an altitudinal gradient on the northern slope of Mt. Changbai, Northeast China [J]. Biodiversity Science, 2004, 12(1): 164-173.

[19] 马克平. 刘玉明. 生物群落多样性的测度方法 Ⅰα 多样性的测度方法(下)[J]. 生物多样性, 1994, 2(4): 231-239.
Ma K P, Liu Y M. Measurement of biotic community diversity. Ⅰα. diversity (Part 2)[J]. Biodiversity Science, 1994, 2(4): 231-239.

[20] Derksen D A, Lafond G P, Thomas G J *et al*. Impact of agronomic practices on weed communities: tillage systems[J]. Weed Science, 1993, 41: 409-417.

[21] Barberi P, Silvestri N, Bonari E. Weed communities of winter wheat as influenced by input level and rotation [J]. Weed Research, 1997, 37(5): 301-313.

[22] 潘俊峰, 万开元, 章力干, 等. 长期有机-无机肥配施对农田杂草土壤种子库的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 480-488.
Pan J F, Wan K Y, Zhang L G *et al*. Effects of long-term combined application of organic manure and chemical fertilizers on farmland weed seedbank in soil [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(2): 480-488.

[23] 尹力初, 蔡祖聪. 长期不同施肥对玉米田间杂草生物多样性的影响[J]. 土壤通报, 2005, 36(1): 77-79.
Yin L C, Cai Z C. The effects of long-term different fertilization on the biodiversity of weeds in maize field[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(1): 77-79.

[24] 李儒海, 强胜, 邱多生, 等. 长期不同施肥方式对稻油两熟制油菜田杂草群落多样性的影响[J]. 生物多样性, 2008, 16(2): 118-125.
Li R H, Qiang S, Qiu D S *et al*. Effects of long-term fertilization regimes on the diversity of weed communities in rape fields under rice-rape cropping system[J]. Biodiversity Science, 2008, 16(2): 118-125..