

不同剂量除草剂对皮、裸燕麦光合特性及产量形成的影响

刘欢¹, 慕平², 赵桂琴¹, 周向睿¹

(1. 甘肃农业大学草业学院/草业生态系统教育部重点实验室/中-美草地畜牧业可持续发展研究中心, 甘肃 兰州 730070;
2. 甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 试验采用单因素随机区组设计, 研究两种茎叶除草剂(立清和麦喜)在三个浓度下对皮燕麦‘陇燕 3 号’和裸燕麦‘白燕 2 号’生产性能指标及不同生育期倒二叶气体交换参数的影响, 并通过综合评价, 筛选高效除草剂的种类和剂量, 以探讨除草剂对燕麦光合生理特性的作用机理。结果表明, 在除草剂适宜浓度范围内(立清 675 ~ 2 025 mL·hm⁻²、麦喜 90 ~ 270 mL·hm⁻²), 与未施用除草剂相比, 除草剂中、高浓度对燕麦子粒产量有明显促进作用, 最高增幅达 34.67%。两种茎叶除草剂对燕麦光合特性的影响为短期刺激效应, 在皮、裸燕麦生长前期(分蘖期、拔节期)除草剂对叶片的叶绿素相对含量(SPAD)、净光合速率(Pn)、蒸腾速率(Tr)和气孔导度(Gs)均有所抑制, 对胞间 CO₂ 浓度(Ci)和水分利用效率(WUE)有所促进, 且随着除草剂浓度的提高, 各光合指标的变幅增大, 在两种除草剂高浓度处理下, 皮燕麦和裸燕麦生长前期的 Pn 值平均比对照低 42.86% 和 50.65%, WUE 高于对照 99.47% 和 86.44%, 开花期后这种影响则逐渐趋于缓和。通过对光合及产量指标的主成分分析, 将 13 个单项指标转换为 3 个相互独立的综合指标, 最终确定燕麦倒二叶 Tr、SPAD、Pn 及子粒千粒重可作为除草剂安全高效评价的参考指标, 筛选出除草剂麦喜浓度在 180 mL·hm⁻² 时效果最佳。

关键词: 除草剂剂量; 燕麦; 光合特性; 产量; 主成分分析
中图分类号: S482.4; S512.6 **文献标志码:** A

The impact of herbicides concentrations on photosynthetic characters and production of covered and naked oat

LIU Huan¹, MU Ping², ZHAO Gui-qin¹, ZHOU Xiang-rui¹

(1. College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University; Key Laboratory of Grassland Ecosystem, Ministry of Education; Sino - U. S. Center for Grazingland Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China;
2. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to investigate the effects of two kinds of post-emergence application herbicides [Bromoxynil octanoate + MCPA - sodium (BOMS) and Florasulam + flumetsulam (FLF)] on yield and photosynthetic characteristics of oat, three concentrations of the two herbicides were conducted on covered oat ‘Longyan 3’ and naked oat ‘Baiyan 2’ with a single-factor randomized bloke design. The gas exchange parameters of top second leaf in different growth stages and yield components of oat were measured. Further, using comprehensive evaluation, suitable concentration and kinds of herbicides with efficient and safe benefits were screened. The results showed that oat yield increased obviously under higher concentrations of herbicides in the reasonable ranges (BOMS concentration of 675 ~ 2 025 mL·hm⁻² and FLF concentration of 90 ~ 270 mL·hm⁻²), the highest was up to 34.67% compared with the control. There was a short term stimulation effect of two kinds of post-emergence application herbicides on photosynthetic characters of oat. The chlorophyll content (SPAD), net photosynthetic rate (Pn), transpiration rate (Tr), and stomatal conductance (Gs) of covered and naked oat leaves were inhibited, instead, the intercellular CO₂ concentration (Ci) and water use efficiency

收稿日期: 2016-07-19 修回日期: 2016-11-29
基金项目: 甘肃省科技厅省青年基金(1506RJYA028); 甘肃农业大学盛彤笙科技创新基金(GSAU-STS-1517); 甘肃省教育厅高等学校科研项目(2015A-075); 现代农业产业技术体系(CARS-08-C)
作者简介: 刘欢(1982—), 女, 讲师, 博士, 研究方向为草种质资源育种及草地生物多样性。E-mail: liuhuan@gsau.edu.cn。
通信作者: 赵桂琴(1970—), 女, 副教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为草种质资源及育种。E-mail: zhaogq@gsau.edu.cn。

(*WUE*) were increased under the herbicides stress during the early growth stages such as tillering stage and elongation stage. The change range increased by herbicide concentration, at the highest concentrations of two herbicides, the *Pn* average values of covered oat and naked oat in early stages were decreased by 42.86% and 50.65% than that of control respectively. Three independent comprehensive components were obtained from 13 single production indexes and photosynthetic indexes of oats by principal component analysis. The *Tr*, *SPAD*, *Pn* of top second leaf and 1000-kernel weight of seed were reference indexes for the prediction of efficient and safe of herbicides. In summary, FLF with concentration of 180 mL·hm⁻² was proposed as the suitable practices for the target area.

Keywords: herbicide concentration; oats; photosynthetic characters; yield; principal component analysis

燕麦(*Avena* L.)是世界范围内广泛种植的禾本科(*Gramineae*)燕麦属(*Avena*)一年生粮、饲兼用作物,主要分布于北半球的温带地区^[1]。我国华北以种植裸粒型的裸燕麦(*Avena nuda* L.)为主,西北及青藏高原地区种植带稃皮燕麦(*Avena sativa* L.)为冬春家畜补饲,二者均具有广泛的生态适应性,是我国半干旱地区及高寒牧区人工草地建设的主要草种,在农业、畜牧业生态建设中具有重要作用。杂草危害一直是影响燕麦高产稳产的重要限制性因子,施用化学除草剂则是当前燕麦田除草应用最广泛,最经济且快速有效的方法。

然而,除草剂又是一把双刃剑,其本身的化学毒性对于生产作物来说,也可成为一种胁迫,使用不当还会对作物生长发育、子粒品质及生态环境造成负面影响,并进一步破坏农业生态平衡。光合作用是植物最重要的生理功能之一,也是生态系统生产力形成的重要基础。除草剂的药害途径之一就是影响植物的光合作用,因此研究除草剂对燕麦光合作用的影响显得尤为必要。大多研究表明光合特性与燕麦的抗逆性有密切关系,植物对各种胁迫的响应是由植物内部多种生理生化反应共同完成,叶片是植物外部形态对逆境胁迫反应最敏感的器官,用叶片光合生理特性的变化可方便、快速地指示其受胁迫程度^[2-3]。与此同时,高产、高效和高安全性是除草剂选择的主要目标,作物产量的干物质多来源于光合作用^[4],诸如小麦(*Triticum aestivum*)、燕麦等麦类作物的子粒产量 80% 以上归功于花后功能叶片的光合产物积累。燕麦倒二叶作为生长发育中、后期最重要的功能叶片之一,其光合效率是决定子粒产量的关键因素^[5]。因此,在施用除草剂条件下,植物叶片保持正常的光合特性是植物能耐受除草剂胁迫的重要原因之一,也是评价除草剂安全性和高效性的重要指标。

目前,国内外学者已在除草剂对小麦、谷子(*Panicum miliaceum*)、水稻(*Oryza sativa*)等目标植物的生长发育、生理代谢等方面开展过积极的研

究^[6-8],对燕麦抗寒、抗旱、抗盐碱等抗逆光合生理特性也有一定的研究^[9-11],而针对燕麦田除草剂的研究却十分局限,仅有部分学者对少数除草剂种类的燕麦田间药效做过研究调查^[12-13],相关除草剂胁迫对燕麦生理特性、光合作用机制及安全性的影响等方面鲜有报道。本试验通过对燕麦田喷施除草剂,结合除草剂对燕麦生产性状及产量的影响,进一步研究两种茎叶除草剂不同剂量下对燕麦生育期内光合特性的动态影响,分析燕麦倒二叶的光合速率、光合功能期等光合生产力与产量形成的关系,以期筛选出燕麦田高效安全除草剂种类及剂量,并为科学施用除草剂,减少药害,建立优质燕麦生产体系提供基础理论依据及技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试燕麦为‘白燕 2 号’(裸燕麦)和‘陇燕 3 号’(皮燕麦),由甘肃农业大学草业学院提供;供试除草剂选用经 2011 年在燕麦田间初筛的优良茎叶除草剂两种,具体剂量处理见表 1。

1.2 试验方法

1.2.1 试验条件及设计 试验地位于甘肃省中部兰州市东郊的榆中县良种繁殖场,属温带半干旱气候,海拔 1 730 m,年均温 6.7℃,无霜期 120 d,年均降雨量 350 mm,蒸发量 1 450 mm,土壤类型为灰钙土,前茬为秋季补播的箭筈豌豆,0~20 cm 土壤有机质为 9.15 g·kg⁻¹,pH 为 8.13。

2012 年播种机条播燕麦,播种量‘陇燕 3 号’为 180 kg·hm⁻²,‘白燕 2 号’为 150 kg·hm⁻²,播种深度 5 cm,小区随机区组排列,面积 20 m²(4 m×5 m),行距 15 cm,区间隔离带宽 0.5 m。除草剂按等差比例各设低、中、高三个浓度梯度(表 1),清水作对照,3 次重复。两种除草剂均为苗后茎叶处理,于燕麦 3~4 叶期施药,除草剂按设计用量兑水 450 kg·hm⁻²,用 YS-16C 型背负式手动喷雾器均匀喷雾。

表 1 供试除草剂及其用量
Table 1 Herbicide treatments and dosages

除草剂 Herbicide	化学结构 Chemical structure	处理代码 Treatment No.	施药剂量 Dose/(mL·hm ⁻²)	生产商 Manufacturer
40% 立清(二甲·辛酰溴) Bromoxynil – octanoate + MCPA – sodium	苯腈类 Benzonitrile	M ₁	675	江苏辉丰农化股份有限公司 Jiangsu Huifeng Chemical Industry Co., LTD.
		M ₂	1 350	
		M ₃	2 025	
58 g·L ⁻¹ 麦喜 (双氟·唑啶磺草胺) Florasulam + Flumetsulam	三唑并嘧啶磺酰胺类 Triazolopyrimidine Sulfonaniline	F ₁	90	美国陶氏益农公司 Dow Agrosciences Company
		F ₂	180	
		F ₃	270	
清水 Water		CK	—	—

1.2.2 光合生理指标测定 在燕麦分蘖期,拔节期,开花期,灌浆期田间取长势、长相和朝向基本一致的主茎倒二叶进行测定。

叶绿素相对含量(SPAD 值):燕麦不同生育期内,每个小区标记 10 片叶子用 SPAD – 502 型叶绿素仪(日本)测定 SPAD 值。

净光合速率(P_n)、蒸腾速率(Tr)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、气孔导度(G_s)的测定:燕麦不同生育期内,选择晴朗无风天气,上午 8:30—11:30 在每个小区选取 5 株长势相近燕麦植株的完全展开倒二叶,采用便携式光合作用测定系统(GFS – 3000,德国)对活体测定,给定气流和光强分别为 $750\ \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $800\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

水分利用效率(WUE)按公式计算: $WUE = P_n / Tr$ 。式中, P_n 为净光合速率, Tr 为蒸腾速率。

1.2.3 产量及产量构成指标测定 干草产量:灌浆期每小区取 6 个 1 m 样段齐地刈割,3 次重复。室内将样品在 105℃ 下杀青 30 min 后,80℃ 烘干至恒重,干样称重。

子粒产量:成熟期全区收获测产。并在每小区随机选取 10 株燕麦分别测定单株千粒重、株高、小穗数、穗粒数和穗长等产量构成指标。

1.3 数据分析方法

采用 SPSS 19.0 对试验结果进行方差分析,并以平均值 ± 标准误表示。利用 SPSS Inv18.0 对灌浆期光合指标及成熟期产量构成指标进行主成分分析,将原来的单项指标转换为新的综合指标。根据综合指标贡献率求出权重值^[14],由特征根和权系数计算得到主成分方程,并对各处理进行综合评价。

2 结果与分析

2.1 除草剂不同剂量对燕麦光合特性的影响

2.1.1 除草剂对燕麦叶片叶绿素相对含量(SPAD)的影响 从图 1 可知,从燕麦分蘖期至开花期,田间

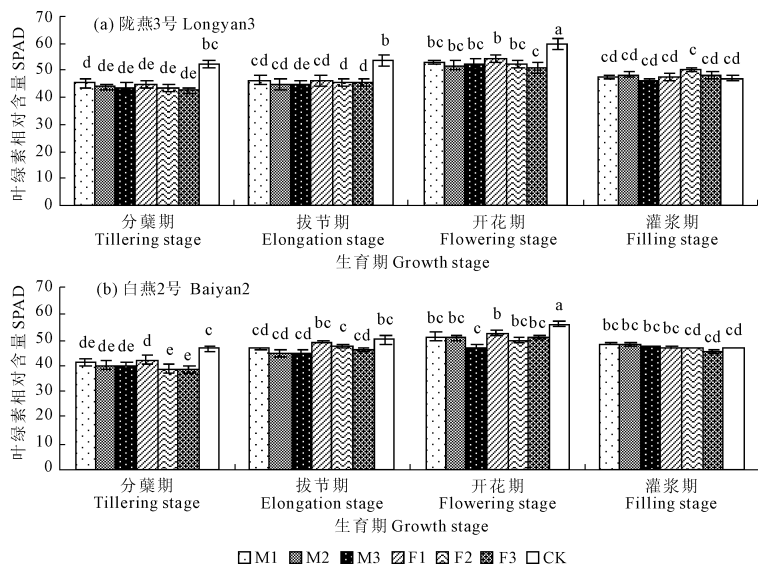
施用两种除草剂的处理与清水对照相比,燕麦叶片 SPAD 值均受到不同程度的抑制,直至灌浆期,各处理 SPAD 值逐渐恢复至对照水平,甚至略高于对照。燕麦叶片不同生育期间的 SPAD 值有一定差异,以分蘖期和开花期间差异较为显著。总体来看,皮、裸燕麦 SPAD 值的变化趋势一致。

随着时间的推移,燕麦倒二叶 SPAD 值在开花期达到最高;燕麦不同生长期,随着除草剂浓度的增高 SPAD 值有所降低,但各浓度间差异不显著($P > 0.05$)。对于皮燕麦‘陇燕 3 号’,M3 各时期的 SPAD 值较低,平均低于对照 12.24%;裸燕麦‘白燕 2 号’的 F3 处理在燕麦生长前期(分蘖期)SPAD 低于对照 17.17%,各生育期内 SPAD 平均低于对照 9.39%。可见,两种除草剂高浓度对燕麦叶片 SPAD 值的抑制作用较大。

2.1.2 除草剂对燕麦净光合速率(P_n)的影响 除草剂对燕麦各个生育时期 P_n 的影响较大,均达到显著水平(见图 2)。在分蘖期至开花期,相比对照,施用除草剂使燕麦叶片 P_n 呈不同程度的降低趋势,随着除草剂浓度的增加,燕麦 P_n 值降低幅度增大;而在灌浆期,除草剂处理下燕麦 P_n 值高于对照,且中、低浓度处理的燕麦 P_n 值较高。皮燕麦‘陇燕 3 号’的 F3 下 P_n 值与对照差异最显著($P < 0.05$),尤其在拔节期低于对照 46.8%。裸燕麦‘白燕 2 号’各生育期 P_n 值的变化趋势与皮燕麦相似:在分蘖期和拔节期,F3 下 P_n 值抑制较大,分别比对照下降了 56.60% 和 51.42%;在开花期,M3 的 P_n 值降幅较大,低于对照 44.7%。F1 与对照相比降幅最小,但仍达显著水平($P < 0.05$)。

在各生育期中,燕麦叶片 P_n 值在开花期达到最高,说明此时燕麦叶片的光合能力较强,为灌浆期的生物量积累打下基础;但各处理与对照之间的差异在燕麦生长后期(开花期和灌浆期)比分蘖期和拔节期小,说明随着时间的推移,除草剂对燕麦 P_n 的

抑制有所恢复,不同除草剂恢复速度不尽一致,相比之下,麦喜的恢复速度较快,且其低浓度总体对 P_n 值影响最小。M3、F3 在整个生育期内 P_n 都较低,说明高浓度除草剂对 P_n 的抑制作用时间较长。



注:图中不同字母间表示各处理间差异显著 ($P < 0.05$),下同。
Notes: Treatments with different letters are significantly different at the 0.05 level; The same as below.

图 1 不同生育期下除草剂对皮、裸燕麦叶片 SPAD 值的影响

Fig.1 Effect on SPAD value of covered and naked oats in different growth stage by herbicide spaying

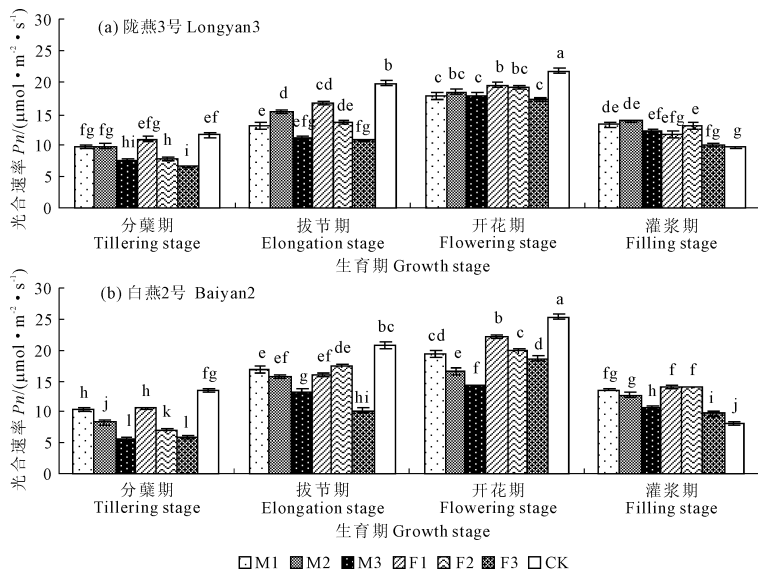


图 2 不同生育期下除草剂对皮、裸燕麦叶片 P_n 值的影响

Fig.2 Effect on P_n value of covered and naked oats in different growth stage by herbicide spraying

2.1.3 除草剂对燕麦气孔导度 (G_s) 的影响 除草剂对不同生育时期的燕麦叶片 G_s 均有一定程度的抑制,且呈现出浓度效应关系,随着除草剂浓度的增加,燕麦叶片 G_s 降低越明显;除草剂在施药前期(分蘖期和拔节期)对 G_s 的抑制作用较强,各处理 G_s 值均与对照差异显著 ($P < 0.05$);而在开花期和灌浆期,两种除草剂中低浓度下 G_s 值与对照差异不明显,基本恢复到对照水平(图 3)。

总体来看,燕麦在开花期的 G_s 最高,且除草剂对燕麦生长前期 G_s 的影响比后期更为明显。‘陇燕 3 号’在各生育期以 M3 下的 G_s 降幅最大,从分蘖期至灌浆期分别比对照下降了 85.2%、58.6%、25.3% 和 17.9%;F1 的降幅最小,在开花期和灌浆期与对照差异不显著 ($P > 0.05$)。对‘白燕 2 号’而言,M3 对 G_s 的抑制仍为最大,而 M1 与对照差异较小,说明燕麦气孔导度对该除草剂的浓度变化较为敏感。

2.1.4 除草剂对燕麦蒸腾速率(T_r)的影响 随着生育期的推进,燕麦叶片 T_r 值总体呈现先升高后降低的趋势,与对照相比,燕麦生长前期除草剂对 T_r 表现出抑制作用,在开花期各处理与对照的差异缩

小,而在灌浆期出现逆转,除草剂处理下的 T_r 高于对照(图 4)。除草剂种类和浓度不同,燕麦叶片 T_r 值的差异显著,且随着除草剂浓度的增加, T_r 有所下降。

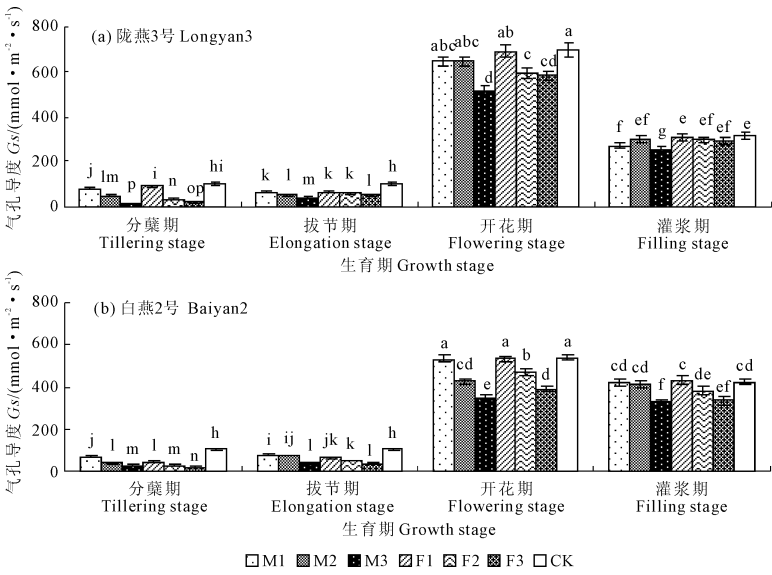


图 3 不同生育期下除草剂对皮、裸燕麦叶片 G_s 值的影响

Fig.3 Effect on G_s value of covered and naked oats in different growth stage by herbicide spraying

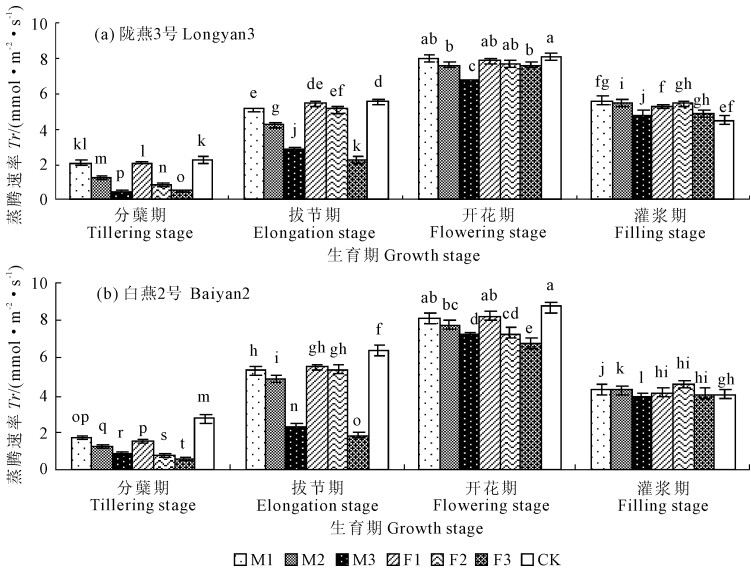


图 4 不同生育期下除草剂对皮、裸燕麦叶片 T_r 的影响

Fig.4 Effect on transpiration rate (T_r) of covered and naked oats in different growth stage by herbicide spraying

皮燕麦‘陇燕 3 号’各生育期以 M3 下的 T_r 值与对照相比降幅最大,分蘖期至开花期平均降幅达 48.2%。F1 与对照差异较小,前期仅比对照下降 3.8%。在裸燕麦‘白燕 2 号’前三个时期 F3 的 T_r 与对照差异明显,降幅分别为 80.4%、71.4% 和 22.0%,而在灌浆期与对照无显著差异;低浓度 M1、F1 下的 T_r 值则均较大。可见,皮燕麦不同生育期的蒸腾作用对高浓度立清较为敏感,而裸燕麦则对

高浓度麦喜敏感度强,耐药性稍差,且低浓度处理下燕麦叶片的 T_r 恢复较快。

2.1.5 除草剂对燕麦胞间 CO_2 浓度(C_i)的影响 如图 5,从分蘖期到开花期,燕麦叶片的 C_i 值总体呈上升趋势,灌浆期有所下降。与对照相比,除草剂处理对 C_i 均有所促进,且随着浓度的增加 C_i 显著增大($P < 0.05$)。各处理在分蘖期、拔节期的 C_i 之间差异显著,开花期后 C_i 虽有不同程度的增加,但

与对照相比已无显著差异($P > 0.05$)。

M3、F3 在皮、裸燕麦在各时期均具有较高的 C_i ，‘陇燕 3 号’田间平均高出对照 19.05% 和 16.20%，但在开花期和灌浆期 C_i 又恢复到对照水平，说明两种除草剂高浓度在燕麦生长前期固定 CO_2 的能力较大，但后期这种效应减弱。

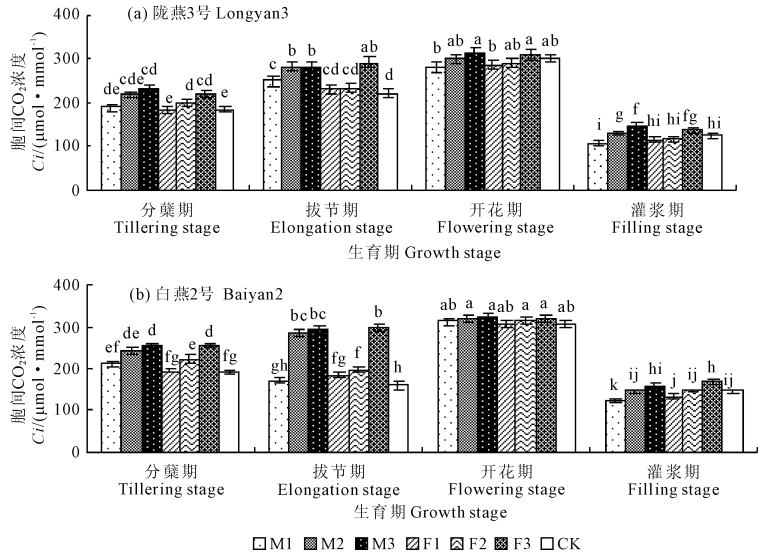


图 5 不同生育期下除草剂对皮、裸燕麦叶片 C_i 的影响

Fig.5 Effect on intercellular CO_2 concentration (C_i) of covered and naked oats in different growth stage by herbicide spraying

2.1.6 除草剂对燕麦水分利用效率的影响 从燕麦分蘖期到灌浆期,皮、裸燕麦叶片的 WUE 总体呈现下降的趋势(图 6)。在‘陇燕 3 号’分蘖期不同浓度除草剂处理间差异显著($P < 0.05$),随着除草剂浓度的增加,燕麦叶片 WUE 也有所增加;尤其是中、高浓度处理下 WUE 均显著高于对照,M3 下皮

燕麦‘陇燕 3 号’叶片的 WUE 可高达 $15.91 \mu mol \cdot mmol^{-1}$;拔节期后各时期燕麦 WUE 呈现迅速下降趋势,各处理间的差异也逐渐缩小。裸燕麦‘白燕 2 号’的 WUE 也表现出相同的变化趋势,高浓度处理 F3 和 M3 在分蘖期和拔节期均有较高的水分利用率,而在开花期则逐渐恢复至对照水平。

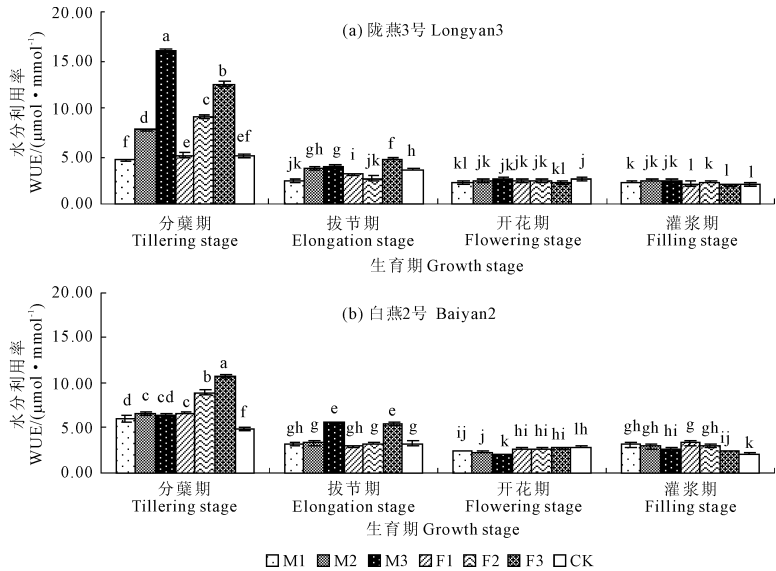


图 6 不同生育期下除草剂对皮、裸燕麦叶片 WUE 的影响

Fig.6 Effect on water use efficiency of covered and naked oats in different growth stage by herbicide spraying

2.2 除草剂不同剂量对燕麦产量的影响

施用除草剂后,各处理的灌浆期干草产量及成熟期子粒产量较对照均有显著提高(表 2),且随着

除草剂浓度的提高有所增加。由于基因型的差异,皮、裸燕麦产量总体表现不同,‘陇燕 3 号’的草产量及种子产量均高于‘白燕 2 号’;在两种除草剂作用

下,‘陇燕 3 号’子粒和干草平均分别增产 26.70%, 22.89%;‘白燕 2 号’平均增产 28.46% 和 31.97%, 可见,施用除草剂对裸燕麦产量的促进作用较皮燕麦更明显。

两种茎叶除草剂对燕麦的增产效果相差不多,立清三个浓度(M1 ~ M3)下皮燕麦产量差异显著,种子产量比对照增加 339 ~ 1 054.8 kg·hm⁻²,平均增产 26.49%,干草产量增产 1 617.3 ~ 3 472.8 kg·hm⁻²;M1 ~ M3 下裸燕麦的种子产量较对照平均增幅为 28.78%。麦喜不同浓度(F1 ~ F3) 下以 F3 对产量的促进作用较明显。相比对照,各处理以 M2 下皮、裸

燕麦田种子产量的增幅最大,可达 35.8% 和 33.6%。

2.3 不同除草剂对燕麦生产性能指标的影响

对成熟期燕麦生产性能考察结果表明(表 3),不同除草剂处理对燕麦营养生长及其产量构成具有一定的影响。多数除草剂处理的产量构成各指标高于未除草对照,各处理在株高、穗长两个指标上与对照差异不显著($P > 0.05$)。总体来看,不同除草剂浓度中,低浓度处理 M1、F1 的各产量构成指标相对较低,皮、裸燕麦各处理中 M2 的各项指标值相对较高,小穗数、穗粒数、千粒重均显著高于 CK,其次为 F2 处理。

表 2 不同剂量除草剂对燕麦饲草及子粒产量的影响

Table 2 Effect of herbicide concentrations on forage yields and grain yield of oat

处理 Treatment	陇燕 3 号 Longyan No.3		白燕 2 号 Baiyan No.2	
	种子产量	干草产量	种子产量	干草产量
	Grain yield/(kg·hm ⁻²)	Hay yield/(kg·hm ⁻²)	Grain yield/(kg·hm ⁻²)	Hay yield/(kg·hm ⁻²)
M1	3 286.3 ± 109cd	13 750.2 ± 301bcde	3 419.5 ± 102b	1 4174.7 ± 317bcd
M2	4 002.1 ± 177 a	15 605.7 ± 214a	3 641.3 ± 91a	1 5008.4 ± 416abc
M3	3 896.1 ± 81ab	15 538.8 ± 438abc	3 472.1 ± 112b	1 4972.9 ± 325abc
F1	3 506.7 ± 118bc	13 608.1 ± 326bcde	3 333.2 ± 79bc	1 3790.4 ± 394bcd
F2	3 922.0 ± 132ab	15 277.7 ± 410abc	3 565.2 ± 96b	1 5158.9 ± 270ab
F3	3 793.6 ± 141ab	15 682.7 ± 214a	3 581.7 ± 114ab	1 5395.3 ± 301a
CK	2 947.3 ± 63d	12 132.9 ± 186e	2 726.2 ± 42d	1 1176.4 ± 145f

表 3 不同除草剂对燕麦产量构成指标的影响

Table 3 Effect of herbicides on component indexes of yield

品种 Variety	处理 Treatment	株高 Plant height /cm	穗长 Ear length /cm	小穗数 Ear /(No·per ⁻¹)	穗粒数 Kernels per spike /(No·per ⁻¹)	千粒重 1000-kernel weight/g
陇燕 3 号 Longyan No.3	M1	113.8 ± 9.2a	18.3 ± 1.9a	23.5 ± 1.9ab	36.2 ± 2.9b	25.7 ± 1.8ab
	M2	119.5 ± 8.3a	19.8 ± 1.3a	24.1 ± 1.0a	43.6 ± 3.2a	27.3 ± 1.9a
	M3	116.7 ± 9.3a	18.6 ± 1.6a	24.9 ± 1.8a	40.2 ± 3.9ab	26.9 ± 1.5a
	F1	120.8 ± 10.1a	19.4 ± 1.3a	22.3 ± 1.9b	35.3 ± 4.0b	24.1 ± 2.1b
	F2	119.2 ± 8.5a	20.1 ± 1.8a	23.9 ± 1.3ab	39.8 ± 3.5ab	27.5 ± 1.9a
	F3	116.8 ± 7.9a	19.4 ± 1.8a	20.3 ± 1.9b	37.9 ± 3.2b	24.9 ± 2.2ab
	CK	119.1 ± 7.4a	18.9 ± 1.7a	22.7 ± 2.0ab	35.2 ± 3.8b	24.5 ± 1.8b
白燕 2 号 Baiyan No.2	M1	111.5 ± 7.3a	15.3 ± 1.4a	18.9 ± 1.7b	43.2 ± 3.1ab	22.5 ± 1.9ab
	M2	112.2 ± 9.1a	14.6 ± 1.7a	22.2 ± 1.9a	46.7 ± 4.0a	24.8 ± 1.7a
	M3	109.3 ± 7.2a	15.2 ± 1.3a	20.4 ± 2.1ab	45.4 ± 3.8a	23.3 ± 2.0ab
	F1	106.4 ± 7.8a	16.3 ± 1.3a	18.2 ± 1.9b	39.9 ± 1.9b	20.9 ± 1.5b
	F2	109.9 ± 6.9a	15.4 ± 1.0a	21.5 ± 2.0ab	42.5 ± 3.5ab	25.1 ± 1.8a
	F3	107.5 ± 9.2a	14.8 ± 1.5a	23.1 ± 1.8a	43.8 ± 2.9ab	23.8 ± 1.9ab
	CK	108.2 ± 8.4a	14.9 ± 1.5a	19.3 ± 1.4b	40.3 ± 3.0b	21.3 ± 1.6b

注:表中不同字母表示同一品种不同处理间差异显著($P < 0.05$)。
Notes: Treatments of the same variety with different letters are significantly different at the 0.05 level.

2.4 不同除草剂下燕麦灌浆期光合与成熟期产量指标的主成分分析

无论从生物学角度还是生产角度来看,燕麦的灌浆期是胚和胚乳形成,也是决定子粒产量形成的

关键时期,此时要保证充足的光合面积和通畅的物质运输。通过主成分分析的皮尔逊相关系数,比较分析灌浆期光合指标及成熟期产量构成指标之间的相关程度,由表 4 可知,施用除草剂处理下,大多数

变量与燕麦种子及干草产量均呈正相关。成熟期各产量构成因子之间,如株高、穗长、小穗数与千粒重间呈显著的正相关,而这些指标与穗粒数间却表现出一定的负相关。总体来看,施用除草剂后,燕麦灌浆期后各光合指标间的相关性没有明显规律。

为了进一步探讨除草剂处理下燕麦的光合生理指标、产量和产量构成指标的关系,筛选适宜的除草剂处理及主要影响因子群,本研究对各项测量指标进行了主成分分析及综合评价。结果表明,第一主成分对燕麦生长及产量的贡献最大,贡献率为 45.301%,加上第二、三主成分方差贡献率,其累积方差贡献率为 85.843%。根据主成分分析原理^[15],累积方差贡献率大于 85%,因而前三个主成分即可代表燕麦光合及产量形成的变异信息。蒸腾速率、千粒重、穗长在第一主成分上有较高载荷;干草产量、种子产量和穗粒数在第二主成分上有较高载荷,

第一、二主成分多数指标是产量构成因子。净光合速率、叶绿素相对含量在第三主成分上有较高载荷,实际可代表燕麦叶片光合要素。

计算主成分得分、综合得分并排列施用除草剂对燕麦光合生理性能及生产性能的影响程度,根据主成分计算公式^[14],得到三个主成分与原 13 项指标的线性组合方程,并将标准化数据代入,可得到各处理及对照分别在 3 个主成分上的得分;再根据 $Z = \sum b_j Z_j = b_1 Z_1 + b_2 Z_2 + \cdots + b_k Z_k$, b 为贡献率,得 $Z = 0.453 Z_1 + 0.242 Z_2 + 0.164 Z_3$,求得综合得分 Z 。如表 5,两种除草剂高浓度处理 M3、F3,麦喜低浓度 F1 及对照的综合得分均为负值,可见田间未施用除草剂或是除草剂施用浓度不当(过高或过低)均不利于燕麦生产。处理 F2、M2 的综合得分 Z 值最高,说明施用中浓度除草剂对燕麦灌浆期、成熟期的光合生长及产量均有一定的促进作用。

表 4 燕麦产量及光合指标 的皮尔逊相关系数
Table 4 Pearson correlation coefficients among yields and the photosynthetic indexes of oats

指标 Indexes	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}
X_1	1.000												
X_2	0.846 * *	1.000											
X_3	0.611 *	0.475	1.000										
X_4	-0.503	-0.664 * *	-0.119	1.000									
X_5	0.707 * *	0.595 *	0.882 * *	-0.061	1.000								
X_6	0.129	0.134	0.378	0.462	0.579	1.000							
X_7	0.464	0.436	0.105	0.010	0.339	0.211	1.000						
X_8	0.084	0.181	0.009	0.186	0.315	0.447	0.434	1.000					
X_9	-0.696 * *	-0.719 * *	0.117	0.439	-0.754 * *	-0.357	-0.077	0.065	1.000				
X_{10}	-0.570 *	-0.613 *	-0.762 * *	0.636 *	-0.210	0.281	-0.600 *	-0.409	0.208	1.000			
X_{11}	-0.496	-0.416	-0.362	0.550	-0.248	0.295	0.098	0.718 * *	0.569 *	0.108	1.000		
X_{12}	0.776	0.816 * *	0.612 *	-0.505	0.732 * *	0.214	0.475	0.399	-0.673 * *	-0.715 * *	-0.349	1.000	
X_{13}	0.392	0.384	0.501	0.311	0.710 * *	0.935 * *	0.377	0.502	-0.455	0.067	0.179	0.442	1.000

注: X_1 : 株高; X_2 : 穗长; X_3 : 小穗数; X_4 : 穗粒数; X_5 : 千粒重; X_6 : 干草产量; X_7 : 叶绿素相对含量; X_8 : 净光合速率; X_9 : 气孔导度; X_{10} : 胞间 CO_2 浓度; X_{11} : 水分利用效率; X_{12} : 蒸腾速率; X_{13} : 种子产量; * 表示显著相关 ($P < 0.05$), * * 表示极显著相关 ($P < 0.01$),下同。
Note: X_1 : Plant height; X_2 : Ear length; X_3 : Ear; X_4 : Kernels per spike; X_5 : 1000-Kernel weight; X_6 : Hay yield; X_7 : SPAD; X_8 : P_n ; X_9 : G_s ; X_{10} : C_i ; X_{11} : WUE ; X_{12} : Tr ; X_{13} : Kernel yield; “*” showed a significant correlation, “* *” showed a highly significant correlation, the same as below.

表 5 不同除草剂处理下主成分得分及综合得分
Table 5 Scores and general scores of principal components of herbicide treatments

处理代码 Treatment No.	第一主成分 Z_1 1st principal component Z_1	第二主成分 Z_2 2st principal component Z_2	第三主成分 Z_3 3st principal component Z_3	综合得分 Z Composite score Z
M1	0.330	-0.387	3.286	0.594
M2	1.753	3.760	0.155	1.729
M3	-0.207	1.956	-3.048	-0.120
F1	-0.758	-1.441	3.051	-0.192
F2	2.571	2.426	1.058	1.925
F3	-0.510	0.140	-3.801	-0.820
CK	-3.178	-6.453	-0.701	-3.116

3 讨 论

植物的光合作用受光强、温度、 CO_2 浓度和土壤肥力等多种外界环境因素和遗传特性等内部因素共同影响。本试验为保持各影响因素一致,选择无风晴朗天气的统一时间段测定,并在光合测定系统中给定光强,保持温度,测定时大气 CO_2 浓度也恒定保持在 $(380 \pm 10) \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,尽量使除草剂对燕麦叶片光合特性的研究结果客观、准确。

植物在逆境胁迫下,常会引起植物体内叶绿素及碳水化合物含量降低、光合速率下降、叶片同化物输出受阻、相对电导率增高、生长受抑等现象^[16],本研究中施用不同剂型、不同剂量的除草剂均对燕麦生长前期的光合作用产生影响,表现为对燕麦倒二叶的 SPAD、 P_n 、 T_r 和 G_s 均产生一定程度的抑制作用,且高浓度下对燕麦光合能力的抑制更为明显;相反,施用除草剂提高了 C_i 和 WUE 。Kaňka、王伟等的研究中证实这种抑制作用会影响燕麦叶片的同化物运输及植株体生长前期的碳素吸收^[17-18]。党建友等^[19]研究表明除草剂胁迫对作物光合可产生不利影响,可使小麦旗叶 SPAD 值和 P_n 下降,并通过改变旗叶光合特性和灌浆进程来影响产量。然而,一些除草剂被认为是很好的生长调节剂,可促进作物光合作用,并利于作物生长。有研究表明低浓度的 2,4-D 丁酯可以增加小麦叶片的 SPAD 值和 P_n ^[20]。Koepe 等认为阿特拉津对玉米叶片的生理代谢会起到激素的作用^[21]。可见,不同除草剂种类对不同基因型植物的光合、灌浆生理指标影响程度有差异。

G_s 是通过影响 CO_2 进入叶片的量来间接影响光合速率。一般情况下, G_s 与 T_r 变化趋势保持一致^[22]。本试验中施用除草剂后燕麦叶片 G_s 和 T_r 均表现出相同的下降趋势,说明除草剂对燕麦叶片气孔的开关有所限制。在分蘖期至开花期,除草剂使燕麦叶片的 C_i 有所促进,根据气孔限制值(L_s)的计算公式 $L_s = 1 - C_i/C_a$,在大气 CO_2 浓度(C_a)较稳定的情况下, C_i 上升则 L_s 降低。因此,本试验除草剂作用期间 P_n 下降伴随着 C_i 的上升和 L_s 减小,根据 Farquhar 和 Sharkeyd 的光合控制理论^[23],可以认为除草剂对燕麦叶片光合能力的影响是由非气孔因素引起的,燕麦叶片细胞固定 CO_2 的能力降低才是主要原因。一般来说,植物在受到干旱、盐碱胁迫后, WUE 就会增大,以避免胁迫的危害^[24]。本试验在施药初期,即燕麦生长分蘖期,除草剂处理使

WUE 有所增大,尤其是高浓度立清(M3)使皮燕麦叶片的 WUE 变得极高,说明该处理对皮燕麦的胁迫较大,因而引起燕麦叶片的应激反应,随着生育期的推进, WUE 的减小则说明燕麦叶片受到的胁迫程度逐渐减轻。

燕麦田干草产量及种子产量在施用除草剂后较对照均有所提高,说明应试除草剂在适宜浓度范围内对燕麦灌浆期和完熟期的生物量累积有促进作用,燕麦花后干物质的累积作用明显高于花前茎秆中干物质的贮藏,且除草剂对燕麦生育前期光合特性的影响远远小于其有效防治杂草所致的光合空间和土壤养分的补偿,从而促进燕麦后期生长发育。同时说明应试茎叶除草剂的持效期在燕麦田施药后的三叶期至开花期内 60~65 d。

除草剂对燕麦的增产作用总体表现出一定的浓度效应,较高剂量下增效明显。中浓度立清(M2)对燕麦种子及干草产量的增效均超过 30%,而高浓度 M3 的效果却不及 M2。吴明根等研究也发现,玉米地施用除草剂玉宝高剂量虽能起到显著的杂草防除目的,但产量低于中间剂量^[25]。可见,无论对杂草还是作物,除草剂毕竟是一种胁迫,尤其是超过一定浓度限值时,能够间接影响植物营养的转移吸收^[26]、甚至是土壤性状^[27]等生理生化特性,进而不同程度地影响燕麦产量,本试验除草剂对燕麦叶片光合作用的短期抑制也是原因之一。当然,也不排除是除草剂施用不当或过量时造成的不明显药害,使产量有所降低^[28]。总之,除草剂对杂草的防效通常是影响燕麦产量的最主要因素^[29]。此外,还需结合除草剂对作物品种的耐药性、生理生化特性及土壤生态环境等方面的研究进一步探讨除草剂对燕麦产量及安全性的影响。

不同除草剂的选择性不同,不同基因型对不同除草剂的耐性及光合响应也有所不同。单正军研究发现禾草克等 3 种除草剂对大豆光合作用影响较大,而对棉花影响较小^[30]。张帆研究表明:丙酯草醚胁迫导致大麦与油菜光合系统和氧化酶活性表现出不同的变化趋势^[31]。本试验中除草剂对皮燕麦叶片生理指标的影响较大,其对皮燕麦、裸燕麦不同种质光合特性的影响虽有一定的差异,但各指标的变化趋势是一致的。总体来看,‘陇燕 3 号’对除草剂胁迫的恢复能力强于‘白燕 2 号’,这可能与裸燕麦光合系统的非光化学耗散能力(NPQ)受到抑制较大有关。

试验中皮、裸燕麦对不同除草剂的敏感性有差

异,皮燕麦‘陇燕 3 号’不同生育期内叶片的 *SPAD*、*Gs*、*Tr*、*Ci* 等光合指标对高浓度立清(M3)敏感,而裸燕麦‘白燕 2 号’则对高浓度麦喜(F3)耐药性较差。Kieloch 等^[32]研究除草剂对不同小麦品种的防效和产量研究中也表现出这种敏感性差异。这与除草剂的作用机理及选择性有关,两种除草剂中,立清为 2 甲 4 氯钠盐和辛酰溴苯腈的复配剂,它本身是一种光合作用抑制剂,又是触杀型除草剂,易被植物体吸收传导,其通过抑制光合作用而杀死杂草的同时也不可避免对燕麦光合系统产生影响,因此对燕麦叶片光合能力的抑制较为明显。而麦喜为唑啉磺草胺和双氟磺草胺的复配剂,它是一种氨基酸生物合成抑制剂,通过抑制植物体内的乙酰乳酸合成酶(ALS)活性以阻止支链氨基酸的生物合成,破坏蛋白质的合成,可对光合生理产生间接影响^[33]。

不同燕麦品种间的抗逆机制存在差异,其对不同除草剂处理下各单项指标的反应不尽相同,因此,很难准确、直观地反映出除草剂对燕麦生产性能和安全性的影响。以往一些相关植物抗寒、抗旱生理研究中已证实主成分分析法可以成功地评价植物抗逆境胁迫的程度^[34-35]。本研究为光合和产量多指标测定基础上除草剂筛选的综合评价提供了一条准确、科学的重要途径。

4 结 论

除草剂对皮燕麦‘陇燕 3 号’和裸燕麦‘白燕 2 号’叶片光合效应和生理功能的影响因除草剂种类、浓度和燕麦种质而异。应试两种茎叶除草剂在燕麦生长前期抑制了燕麦倒二叶的 *SPAD*、*Pn*、*Tr* 和 *Gs*,但促进了 *Ci* 和 *WUE* 的增高。然而,施用两种除草剂对光合的抑制仅是短暂效应,随着生育时期的推进,花后燕麦种质的各光合指标均逐渐恢复,且燕麦最终生物量也未受到抑制影响。对燕麦成熟期生产性能分析表明,施用除草剂对燕麦的株高、穗长等指标影响较小,而燕麦子粒和干草产量均随着除草剂浓度的提高有所增加。*Tr*、*Pn*、*SPAD*、千粒重、穗粒数等指标与产量有明显相关性,均可作为主成分分析的重要指标,用来衡量施用除草剂条件下燕麦光合生产效率。

通过综合评价,除草剂处理 F2(180 mL·hm⁻²麦喜)、M2(1 350 mL·hm⁻²立清)、M1(675 mL·hm⁻²立清)的综合得分均为正值,表明其对燕麦生长后期的光合形成及产量均有促进作用,其中,除草剂麦喜施用浓度为 180 mL·hm⁻²,对燕麦生产最为有利,且具

有较好的生态安全性。

参 考 文 献:

- [1] 慕 平,赵桂琴,柴继宽.基于 GGE - Biplot 的甘肃省不同生态区燕麦生产性能及适应性分析[J].中国生态农业学报,2015,23(6):705-712.
- [2] 刘 欢,赵桂琴.燕麦抗逆性研究进展[J].草原与草坪,2007(6):63-68.
- [3] Xiao L Y, Lei J, Hong Y, et al. Toxic reactivity of wheat (*Triticum aestivum*) plants to herbicide isoproturon[J]. Agricultural and Food Chemistry, 2008,56(12):4825-4831.
- [4] Chen Y, Yun L P, Wang X H, et al. Relationship between grain yield and leaf photosynthetic rate in super hybrid rice[J]. Plant Physiol & Mol Biol, 2007,33(3):235-243.
- [5] 张英华,杨佑明,曹 莲,等.灌浆期高温对小麦旗叶与非叶器官光合和抗氧化酶活性的影响[J].作物学报,2015,41(1):136-144.
- [6] 高贞攀,郭平毅,原向阳,等.苯磺隆和单喹磺隆对张杂谷 10 号光合特性及产量构成的影响[J].中国农业大学学报,2015,20(6):36-45.
- [7] 周 通,陆文静,王 艳,等.3 种除草剂对寒地水稻的生理效应研究[J].植物保护,2016,42(2):114-118.
- [8] Khaliq A, Matloob A, Tanveer A, et al. Reduced doses of a sulfonylurea herbicide for weed management in wheat fields of Punjab, Pakistan[J]. Chilean Journal of Agricultural Research, 2011,71(3):424-429.
- [9] 张 娜,赵宝平,郭若龙,等.水分胁迫对不同抗旱性燕麦品种生理特性的影响[J].麦类作物学报,2012,32(1):150-156.
- [10] Peltonensainio P, Makela P. Comparison of physiological methods to assess drought tolerance in oats[J]. Soil and Plant Science, 1995,45(1):32-38.
- [11] 刘 欢,慕 平,赵桂琴,等.除草剂对燕麦产量及抗氧化特性的影响[J].草业学报,2015,24(2):41-48.
- [12] Nader S, Christy S, Peter H S. Effect of biostimulants added to postemergence herbicides in corn, oats and winter wheat[J]. Agricultural Sciences, 2015,6:527-534.
- [13] 郭小刚,刘景辉,李立军,等.不同耕作方式对杂草控制及燕麦产量的影响[J].中国农学通报,2010,26(18):111-115.
- [14] 谢志坚.农业科学中的模糊数学方法[M].武汉:华中理工大学出版社,1983.
- [15] 袁志发,孟德顺.多元统计分析[M].西安:天则出版社,1993.
- [16] Li Y J, Ye F. Effects of herbicide safeners on levels and activity of cytochrome P450 and other enzymes of crop[J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2003,5(3):9-15.
- [17] Kaňa R, Pundová M, Ilík P, et al. Effect of herbicide cloma-zone on photosynthetic processes in primary barley (*Hordeum vulgare* L.) leaves[J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2004,78(3):161-170.
- [18] 王 伟,郭平毅,原向阳,等.冬小麦叶片光合特性对除草剂世玛的响应及其机理[J].麦类作物学报,2011,31(3):540-543.
- [19] 党建友,裴雪霞,王姣爱,等.除草剂使用时期对小麦子粒产量、品质及光合特性的调控效应[J].中国生态农业学报,2009,17(2):36-39.

数较低,林地的 ESV 不仅把减少的耕地及草地的 ESV 抵消掉,还使整体 ESV 有所升高,说明林地在西北旱区 ESV 中扮演着重要角色,它的减少将会使整体 ESV 急剧下降。这就要求政府及人民努力保护好林地资源,争取实现土地质量与数量的“双赢”。

参 考 文 献:

[1] 李 晶,任志远.陕北黄土高原土地利用生态服务价值时空研究[J].中国农业科学,2006,39(12):2538-2544.

[2] Costanza R, Arge R, Groot R. The Value of the world's ecosystem service and natural capital[J]. Nature, 1997,387(15):253-260.

[3] Chen M Q, Lu Y F, Ling L, et al. Drivers of changes in ecosystem service values in Ganjiang upstream watershed[J]. Land Use Policy, 2015,47(9):247-252.

[4] Li G D, Fang C L. Global mapping and estimation of ecosystem services values and gross domestic product: A spatially explicit integration of national 'green GDP' accounting[J]. Ecological Indicators, 2014, 46(11):293-314.

[5] 李 超,杜 哲,陈亚恒,等.环京津地区土地生态服务价值时空分异特征[J].土壤通报,2015,46(1):42-46.

[6] 张文海,赵 阳,余新晓,等.基于 LUCC 的黄土丘陵区生态服务价值动态演变研究[J].应用基础与工程科学学报,2013,3(6):442-450.

[7] 郭荣中,杨敏华.长株潭地区生态系统服务价值分析及趋势预测[J].农业工程学报,2014,30(5):238-244.

[8] 李文华,张 彪,谢高地.中国生态系统服务研究的回顾与展望[J].自然资源学报,2009,24(1):1-10.

[9] 谢高地,甄 霖,鲁春霞,等.一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J].自然资源学报,2008,23(5):911-919.

[10] 谢高地,张彩霞,张昌顺,等.中国生态系统服务的价值[J].资源科学,2015,37(9):1740-1746.

[11] 赵永华,张玲玲,王晓峰.陕西省生态系统服务价值评估及时空差异[J].应用生态学报,2011,22(10):1662-1672.

[12] 樊玉山,刘纪远.西藏自治区土地利用[M].北京:科学出版社,1994.

[13] 何 锋.长武县土地资源安全评价[D].杨凌:西北农林科技大学,2009.

[14] 刘帅宾.基于土地利用变化的青海省生态服务价值研究[D].郑州:河南大学,2014.

[15] 黄贤金,濮励杰,彭补拙.城市土地利用变化及其响应:模型构建于实证研究[M].北京:科学出版社,2008.

(上接第 133 页)

[20] 任建跃.2,4-D,多效唑和氮肥混用对小麦光合作用的影响[J].现代农业科学,2008,15(3):19-21.

[21] Koeppel M K, Hirata C M, Brown H M, et al. Basis of selectivity of the herbicide rimsulfuron in maize[J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2000,66(3):170-181.

[22] 刘小文,王秋霞,郭美霞,等.两种除草剂对紫茎泽兰光合特性的影响[J].农业环境科学学报,2010,29(7):1247-1253.

[23] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1982,(33):317-345.

[24] 罗亚勇,赵学勇,黄迎新,等.植物水分利用效率及其测定方法研究进展[J].中国沙漠,2009,29(4):648-651.

[25] 吴明根,刘海峰,韩云哲,等.除草剂玉宝防除玉米地杂草的效果[J].延边大学农学报,2000,22(4):270-274.

[26] Malhi S S, Lemke R, Wang Z H, et al. Nitrogen and crop residue effects on crop yield, nutrient uptake, soil quality, and greenhouse gas emissions[J]. Soil and Tillage Research, 2006,90(12):171-183.

[27] 谢志坚,徐昌旭,刘光荣,等.不同剂量苄·丁和二氯喹啉酸对紫云英生长环境及其养分吸收累积的影响[J].草业学报,2014,23(5):201-207.

[28] Zhang Z H, Weaver S E, Hamill A S. Risks and reliability of using herbicides at below-labeled rates[J]. Weed Technology, 2000,14:106-115.

[29] 周汉章,刘 环,宋银芳,等.44%谷友 WP 对谷田杂草的防除及其对谷子产量的影响[J].中国农学通报,2011,27(30):135-141.

[30] 单正军,蔡道基,陈祖义.除草剂对植物光合作用和吸肥能力影响初探[J].农村生态环境,1993,2:47-50.

[31] 张 帆.丙酯草醚胁迫下油菜与小麦耐性机制及其生理信息的光谱模型构建[D].杭州:浙江大学,2009.

[32] Kieloch R, Rola H. Sensitivity of winter wheat cultivars to selected herbicides[J]. Journal of Plant Protection Research, 2010,50(1):35-40.

[33] 侯 珍,丛 聪,郭文磊,等.不同小麦品种对双氟磺草胺的耐药性差异及机理[J].农药学报,2012,14(3):260-266.

[34] 刘海卿,孙万仓,刘自刚,等.北方寒旱区白菜型冬油菜抗寒性与抗旱性评价及其关系[J].中国农业科学,2015,48(18):3743-3756.

[35] 苏李维,李 胜,马绍英,等.葡萄抗寒性综合评价方法的建立[J].草业学报,2015,24(3):70-79.