

DOI: 10.11686/cyxb2020007

http://cyxb.magtech.com.cn

何海锋, 闫承宏, 吴娜, 等. 施氮量对柳枝稷叶片叶绿素荧光特性及干物质积累的影响. 草业学报, 2020, 29(11): 141—150.

He H F, Yan C H, Wu N, et al. Effects of nitrogen application rate on chlorophyll fluorescence characteristics and dry matter accumulation in switchgrass (*Panicum virgatum*) leaves. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(11): 141—150.

施氮量对柳枝稷叶片叶绿素荧光特性及干物质积累的影响

何海锋¹, 闫承宏¹, 吴娜¹, 刘吉利^{2,3*}, 常雯雯²

(1. 宁夏大学农学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学资源环境学院, 宁夏 银川 750021;

3. 宁夏旱区资源评价与环境调控重点实验室, 宁夏 银川 750021)

摘要: 研究施氮量对柳枝稷叶绿素荧光特性及干物质积累的影响, 对提高盐碱地柳枝稷光能利用效率及生物质产量具有重要意义。在宁夏银北地区采用大田试验, 以 Cave-in-Rock 品种柳枝稷为供试材料, 在无氮添加(0 kg · hm⁻², N₀)、施低氮(60 kg · hm⁻², N₆₀)、中氮(120 kg · hm⁻², N₁₂₀)和高氮(240 kg · hm⁻², N₂₄₀)共 4 个施肥水平下, 比较了开花期和成熟期柳枝稷叶片叶绿素荧光参数和干物质积累动态变化, 采用灰色关联度分析法对柳枝稷叶片叶绿素荧光参数与干物质积累量进行研究。结果表明: 与 N₀ 相比, 在 N₆₀、N₁₂₀ 和 N₂₄₀ 处理下柳枝稷开花期和成熟期叶片 PSII 最大光化学效率(F_v/F_m)、PSII 实际光化学量子效率(Φ_{PSII})、潜在活性(F_v/F_o)、光化学猝灭系数(qP)、非光化学猝灭系数(NPQ)和干物质积累量均显著性提高, 在 N₂₄₀ 处理下达到峰值, 而热耗散量子比率(F_o/F_m)显著性降低。在柳枝稷开花期, 随着施氮量的增加, 柳枝稷叶片 PSII 潜在活性(F_v/F_o)显现出先上升后逐渐下降的总趋势。在 N₁₂₀ 处理下柳枝稷叶片 PSII 潜在活性(F_v/F_o)最大, 为 3.13, 较 N₀ 处理显著提高了 16.26%。柳枝稷干物质积累量随着生育时期的推进和施氮量的增加, 均有不同程度的提高, 其中在开花期至成熟期, 干物质积累缓慢, 在灌浆期达到最大, 成熟后期略有降低。柳枝稷成熟期干物质积累量在 N₂₄₀ 处理下最高, 每穴干物质积累达 378.13 g, 较 N₀、N₆₀ 和 N₁₂₀ 处理显著提高了 24.33%、20.09% 和 7.24%。灰色关联度分析结果表明, 在本试验条件范围内, N₂₄₀ 处理下加权关联度与理想施肥水平的关联度最大, 有利于促进 PSII 的光化学活性, 从而提高柳枝稷干物质积累量。

关键词: 施氮量; 柳枝稷; 叶绿素荧光; 灰色关联度分析

Effects of nitrogen application rate on chlorophyll fluorescence characteristics and dry matter accumulation in switchgrass (*Panicum virgatum*) leaves

HE Hai-feng¹, YAN Cheng-hong¹, WU Na¹, LIU Ji-li^{2,3*}, CHANG Wen-wen²

1. College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. College of Resources and Environmental Science, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 3. Key Laboratory of Resource Evaluation and Environmental Regulation in Dry-land Region of Ningxia, Yinchuan 750021, China

Abstract: The effect of nitrogen fertilizer application rate on chlorophyll fluorescence characteristics and dry matter accumulation of switchgrass (*Panicum virgatum*) is of great significance for the improvement of light use efficiency and biomass yield of switchgrass in saline-alkali land. In this research, the patterns of variation in chlorophyll fluorescence parameters and dry matter accumulation in switchgrass were studied in field conditions

收稿日期: 2020-01-07; 改回日期: 2020-03-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(31860344, 31560361)资助。

作者简介: 何海锋(1992-), 男, 陕西武功人, 在读硕士。E-mail: hehf0629@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: tim11082003@163.com

with a range of nitrogen application treatments: no nitrogen ($0 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, N_0), low nitrogen application ($60 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, N_{60}), medium nitrogen application ($120 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, N_{120}) and high nitrogen application ($240 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, N_{240}), and the comprehensive effect of nitrogen application on chlorophyll fluorescence and dry matter accumulation in switchgrass was evaluated using a multivariate Grey relational analysis procedure. It was found that: under N_{60} , N_{120} and N_{240} treatments, the PS II maximum photochemical efficiency (F_v/F_m), PS II actual photochemical quantum efficiency (Φ_{PSII}), potential activity (F_v/F_o), photochemical quenching (qP), non photochemical quenching (NPQ) and biomass yield were significantly higher, and the heat dissipation of quantum ratio (F_o/F_m) was significantly lower than for the N_0 treatment during the flowering and seed maturation stages of switchgrass development. During the flowering period of switchgrass, the PS II potential activity (F_v/F_o) was initially increased and subsequently decreased across the range of nitrogen application rates, with a maximum observed value of 3.13 at N_{120} (increased 16.26% compared with N_0). The effect of nitrogen application rate on dry matter accumulation differed between the crop growth stages. Dry matter accumulation was high during jointing and booting periods, reached its maximum at the seed filling stage, and decreased slightly thereafter. The maximum observed dry matter accumulation ($378.13 \text{ g} \cdot \text{hole}^{-1}$) occurred under the N_{240} treatment during the post-flowering stage and was, respectively, 24.33%, 20.09% and 7.24% higher than that of the N_0 , N_{60} and N_{120} treatments. Grey relational analysis showed that the association between the weighted correlation index and the ideal fertilization level was the highest under the N_{240} treatment. In summary, the N_{240} treatment in this study in the Yinbei saline-alkali area of Ningxia optimized the photochemical activity of PS II and dry matter accumulation of switchgrass.

Key words: nitrogen application; switchgrass (*Panicum virgatum*); chlorophyll fluorescence; grey relational analysis

氮素营养是植物生长发育必不可少的大量营养元素之一,也是植物体内蛋白质、核酸、叶绿素和一些激素等的重要组成部分,对植物的叶绿素荧光特性及积累量和品质具有明显的影响和调节作用^[1],研究合理施用氮肥,是改善植物光合特性,促进植物生长的一项重要调控措施,对提高氮肥利用率和作物的积累量、品质,保护生态环境非常重要^[2-4]。但在实际的生产中,由于缺乏合理的养管理措施和技术指导,过量施用氮肥的现象十分普遍。研究发现,过量的氮肥投入不仅成为一种经济的消耗,同时还会降低肥料利用效率,甚至会对土壤、水体等产生不良的环境影响,导致土壤硝态氮的累积,并且加大下层土壤淋失的风险^[5]。植物体内发出的荧光与光合作用的一系列生理生化过程紧密联系,包含了植物体光合作用的动态变化过程信息。因此,叶绿素荧光被认为是研究植物体光合作用与环境关系的重要指标^[6-7]。

叶绿素荧光参数作为光合作用的探针,不仅能够反映植株叶片进行光合作用时光系统 II (PS II) 对光能的吸收、传递、耗能等情况^[7-8],而且与 ATP(adenosine triphosphate)合成及 CO_2 固定等过程都密切相关,几乎所有与光合作用有关的变化过程均可以通过叶绿素荧光表现出来,能够准确反映叶片吸收光能的分配去向^[8]。当外界环境发生变化时,叶绿素荧光参数也会发生相应的变化,因此可在某种程度上反映环境因子对作物的影响。其中 F_v/F_m 代表 PS II 的最大光化学效率,植物对光能的利用效率,是反映植物在胁迫条件下光合作用受抑制程度的理想指标,其在非胁迫条件下较稳定,而在胁迫条件下会明显下降^[9-10]; F_v/F_o 代表 PS II 的潜在活性; F_o/F_m 代表 PS II 的热耗散量子比率,反映的是植株叶片衰老程度的重要指标; PS II 的实际光化学量子效率 (Φ_{PSII}) 为反应中心部分关闭时的实际原初光能捕获效率,表征作用光下 PS II 吸收光能用于原初醌电子受体(primary quinone electron acceptor, Q_A) 还原的实际运行效率,是一个被广泛应用的荧光参数^[10]; qP (photochemical quenching)代表光化学猝灭系数,反映了光能向光合碳同化方向转移的比率^[10-11]; NPQ (none photochemical quenching)代表非光化学猝灭系数,反映了以热的形式耗散的光能部分,热耗散是植物 PS II 的一种自我保护机制,对光合机理有一定的保护作用^[11-12]。

柳枝稷(*Panicum virgatum*)原产于美国,是多年生禾本科 C_4 作物,植株高大,根系发达,具有适应性广、抗逆能力强等特点,且富含纤维素,既可作为饲草,也可作为水土保持和风障植物,同时也是很好的生物燃料^[13]。相比其他多年生草本植物和传统农作物,柳枝稷能够适应粘壤土、砂壤土等多种土壤类型,具有较低的投入和维护成本、较高的净能源产出,一旦建植成功可持续利用至少 15 年以上^[13-14],是良好的生态修复和生物改良材料^[15]。宁夏盐碱土主要集中在银北地区,大约 $1.14 \times 10^5 \text{ hm}^2$,该地区气候干燥、土壤蒸发量大、盐渍化程度高、降水稀少,是我国西北地区最具代表性的盐碱土之一。该地区生态脆弱、植被覆盖率低,非常适合种植柳枝稷。目前,关于柳枝稷的研究大多集中在新品种选育、抗旱性评价及品质评估方面,而关于施氮量对柳枝稷叶片的叶绿素荧光特性的影响的研究较少。因此,本研究选择在柳枝稷分蘖期,对柳枝稷进行施肥处理,比较了不同浓度氮添加下柳枝稷叶片的叶绿素荧光差异及其与干物质积累之间的关系,以期揭示氮添加后柳枝稷干物质积累和叶绿素荧光的响应规律,为西北盐碱地区柳枝稷合理施肥和高产高效栽培提供理论基础。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验于 2018—2019 年在宁夏大学西大滩盐碱地综合改良试验站进行,该试验站位于宁夏石嘴山市平罗县前进农场(海拔 1150 m, $38^{\circ}50' \text{ N}$, $106^{\circ}24' \text{ E}$)。试验地块选择中度盐碱地,研究区域属于典型的半干旱大陆性气候,年均气温为 $9.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$,在 $-20.5 \sim 33.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\geq 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的积温为 $3350 \text{ }^{\circ}\text{C}$;年降水量为 205 mm,年均蒸发量 1875 mm。试验地块为典型的龟裂碱土,耕层土壤(0~20 cm)的有机质及全盐含量分别为 8.47 和 $3.78 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮、速效磷和速效钾含量分别为 $20.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $5.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $64.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤碱化度为 18.5% ,pH 值为 8.93。

1.2 试验设计

本试验选取的柳枝稷材料为品种 Cave-in-Rock,其生态类型为高地型,染色体倍性为八倍体,原产地为 Southern Illinois 38° N ,种子由北京草业与环境发展研究中心提供。采用大田试验,进行随机区组设计,设置 4 个施氮水平,无氮(无人工施肥)、纯 N $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、纯 N $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、纯 N $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,供试肥料为尿素,每个水平设 3 次重复,分小区种植,共计 12 个小区。每个小区长 8 m,宽 5 m,小区面积为 40 m^2 ,种植行距为 50 cm,株距为 20 cm。所有柳枝稷采用育苗移栽方式种植,于 2016 年 3 月底在温室内育苗,待幼苗长到 5 叶期,挑选出长势一致、生长健壮的植株幼苗进行移栽。建植当年每 hm^2 施 60 kg 纯 N、 50 kg P_2O_5 和 50 kg K_2O ,建植第 2 年每 hm^2 施 120 kg 纯 N,从第 3 年起,开始实施不同施氮量处理,按照当地旱作物进行灌溉管理。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 叶绿素荧光参数的测定 在柳枝稷开花期和成熟期,选一晴天早上的 9:00—11:00,采用 FMS-2 型便携调制式荧光仪(Hansatech,英国)测定叶绿素荧光参数,选取柳枝稷叶片(从上数第 2 片全展叶)3 片,先测定光适应下的最大荧光(F_m')、初始荧光(F_o')及稳态荧光(F_s),然后用荧光夹子夹住叶片使其暗反应 30 min 后,拉开暗室板,再用便携式荧光仪对准夹子接口处测定系统直接测定柳枝稷叶片的荧光参数 F_o 、 F_m 和 F_v ,并计算 PS II 最大光化学效率(F_v/F_m)、PS II 实际光化学量子效率(Φ_{PSII})、PS II 的潜在活性(F_v/F_o)、PS II 的热耗散量子比率(F_o/F_m)及 PS II 最大光化学效率作用光下实际的光化学淬灭系数(qP)和非光化学淬灭系数(NPQ)。其中 Φ_{PSII} 反映了与光合作用原初反应中的 PS II 的开闭和天线色素分子发射的荧光过程, $\Phi_{\text{PSII}} = (F_m' - F_s)/F_m'$; qP 反映了 PS II 反应中心的开放程度, $qP = (F_m' - F_s)/(F_m' - F_o')$; NPQ 可以用来表示植物热耗散的能力变化, $NPQ = (F_m - F_m')/F_m' = F_m/F_m' - 1$ 。

1.3.2 干物质积累量和构成比例的测定 在柳枝稷返青期、开花期、成熟期、开花期、灌浆期、成熟期,分别在每个小区选取代表性植株 5 株进行取样,去除灰尘后,即刻称量鲜重,于 $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 鼓风干燥箱中杀青 0.5 h 后,随即在 $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 下烘干至恒重,然后用电子天平称量其干重,并计算每穴柳枝稷干物质积累量及成熟后茎、叶、穗各部分所占的百分比。

1.4 灰色关联度分析

1.4.1 确立评价对象与指标体系 以 4 种不同施氮水平作为评价对象,评价指标选取成熟期的叶绿素荧光参

数: F_o/F_m 、 F_v/F_o 、 F_v/F_m 、 qP 、 NPQ 、 Φ_{PSII} 和干物质积累量 7 个指标构成数据列。

1.4.2 构建数学模型 第 1 步: 建立参考数据列和比较数据列。由各指标实测的最优值组成“理想施氮水平”, 从而构成参考数据列: $X_0(x) = \{X_0(1), X_0(2), X_0(3), \dots, X_0(m)\}$, 其中 $x=1, 2, 3, \dots, m$, m 为测定指标数; 同一施氮水平下叶绿素荧光参数的实测值构成比较数据列: $X_i(k) = \{X_i(1), X_i(2), X_i(3) \dots X_i(n)\}$, $k=1, 2, 3, \dots, n$, n 为不同的施氮水平。本研究选取柳枝稷成熟期 F_o/F_m 、 F_v/F_o 、 F_v/F_m 、 qP 、 NPQ 、 Φ_{PSII} 和干物质积累量各指标的最优值为理想施氮水平相应的特征值, 即 $X_0(x) = \{0.32, 2.11, 0.68, 0.64, 0.39, 0.33, 24.41\}$, 同一施氮水平相对应的实测指标构成比较数据列。第 2 步: 无量纲区间化。为了消除各指标量纲带来的影响, 要进行无量纲区间化, 即把各指标的实测值转化为评价值, 用 $X_i(k)/X_0(x)$ 表示, 所有数值均在 $[0, 1]$ 之间^[16]。第 3 步: 建立关联系数

$$\epsilon_i(k) = \frac{\min \min \Delta_i(k) + \rho \max \max \Delta_i(k)}{\Delta_i(k) + \rho \max \max \Delta_i(k)} \quad (1)$$

式中: $\Delta_i(k) = |X_0(x) - X_i(k)|$, 表示 X_0 和 X_i 在第 k 点的绝对差值; $\min \min \Delta_i(k)$ 为二级最小差; $\max \max \Delta_i(k)$ 为最大二级差; ρ 为分辨系数, ρ 值越小, 则关联系数间的差异越大, 区分能力越强, 取值范围为 $[0, 1]$, ρ 一般取 0.5 ^[16-17]。第 4 步: 根据以上公式建立灰色关联度

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \epsilon_i(k); \gamma_i' = \sum_{k=1}^n \epsilon_i(k) \omega_i(k) \quad (2)$$

式中: γ_i 为等权关联度, 将 $\epsilon_i(k)$ 求平均值, 得到不同施氮水平下柳枝稷的等权关联度 γ_i ; γ_i' 为加权关联度; $\omega_i(k)$ 为权重系数。

1.5 数据分析与处理

所有数据的处理和统计图的绘制均通过 Microsoft Excel 2010 进行。采用 SPSS 23.0 统计分析软件对试验数据进行 One-way ANOVA 方差分析与相关分析, 并使用 Duncan 法进行多重比较, 显著性水平设置为 0.05。

2 结果与分析

2.1 不同施氮水平对柳枝稷叶绿素荧光的影响

2.1.1 施氮量对柳枝稷叶片的 PS II 最大光化学效率和潜在活性的影响 与不施氮处理相比, 柳枝稷叶片 PS II 最大光化学效率 (F_v/F_m) 在开花期和成熟期均随着施氮量的增加而显著升高 ($P < 0.05$) (图 1A)。在开花期, N_{60} 、 N_{120} 和 N_{240} 处理较 N_0 处理柳枝稷叶片的 F_v/F_m 分别提高了 16.07%、21.42% 和 21.39%。 N_{60} 处理下, 柳枝稷叶片的 F_v/F_m 与其他各处理之间均存在显著差异 ($P < 0.05$), N_{120} 和 N_{240} 处理之间没有显著差异 ($P > 0.05$)。在柳枝稷成熟期, N_{60} 、 N_{120} 和 N_{240} 较 N_0 处理叶片的 F_v/F_m 分别提高了 4.23%、7.04% 和 2.82%, 但 N_{60} 、 N_{120} 和 N_{240} 处理之间不存在显著差异 ($P > 0.05$)。

在开花期和成熟期, 柳枝稷叶片的 PS II 潜在活性 (F_v/F_o) 随着施氮量的增加而显著提高 ($P < 0.05$) (图 1B)。在柳枝稷开花期, 与 N_0 相比, N_{60} 、 N_{120} 和 N_{240} 处理显著提高了叶片的 F_v/F_o , 分别提高了 41.09%、62.02% 和 63.57%, 其中, N_{120} 和 N_{240} 处理之间没有显著差异 ($P > 0.05$)。在柳枝稷成熟期, N_{60} 、 N_{120} 和 N_{240} 较 N_0 处理叶片的 F_v/F_o 显著提高 ($P < 0.05$), 其中, N_{120} 处理下最高, 为 3.13, 与 N_0 处理相比, N_{60} 、 N_{120} 和 N_{240} 处理下柳枝稷叶片的 F_v/F_o 分别提高了 16.26%、27.24% 和 13.01%, 但 N_{60} 、 N_{120} 和 N_{240} 处理之间没有显著差异 ($P > 0.05$)。

2.1.2 施氮量对柳枝稷叶片的 PS II 热耗散量子比率和性能指数的影响 柳枝稷开花期和成熟期叶片的 PS II 热耗散量子比率 (F_o/F_m) 随着施氮量的增加总体呈现递减的趋势 (图 2A)。 N_0 处理下, 柳枝稷开花期叶片 F_o/F_m 最大, 为 0.44。 N_{60} 、 N_{120} 和 N_{240} 较 N_0 处理均显著降低 ($P < 0.05$), 分别降低了 20.45%、27.27% 和 27.31%, 但 N_{120} 和 N_{240} 处理之间差异不显著 ($P > 0.05$), 与 N_{60} 处理之间均存在显著差异 ($P < 0.05$)。在柳枝稷成熟期, N_0 处理下叶片的 F_o/F_m 最大, 为 0.28。与 N_0 处理相比, N_{60} 、 N_{120} 和 N_{240} 处理均显著降低 ($P < 0.05$), 分别降低了 7.14%、14.29% 和 7.15%, 其中 N_{60} 、 N_{120} 和 N_{240} 处理之间没有显著差异 ($P > 0.05$)。

在柳枝稷开花期,随着施氮量的增加,叶片的 PS II 实际光化学量子效率(Φ_{PSII})呈现出递增的趋势,与 N_0 处理相比, N_{60} 、 N_{120} 和 N_{240} 处理 Φ_{PSII} 显著提高了 17.86%、28.57% 和 42.86% (图 2B)。在柳枝稷成熟期,叶片的 Φ_{PSII} 也随着施氮量的增加呈现出逐渐上升的总趋势,其中 N_{120} 和 N_{240} 处理下, Φ_{PSII} 不存在显著差异($P>0.05$),但均显著高于其他各施氮处理($P<0.05$)。与 N_0 处理相比, N_{60} 、 N_{120} 和 N_{240} 处理下柳枝稷叶片的 Φ_{PSII} 分别显著提高了 10.71%、14.29% 和 17.86%。

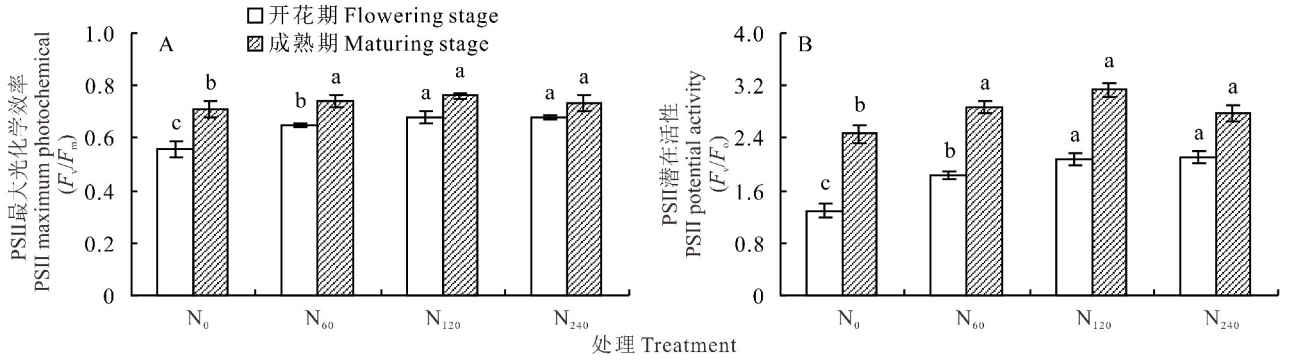


图 1 柳枝稷叶片的 PS II 最大光化学效率和潜在活性

Fig. 1 PS II maximum photochemical efficiency and potential activity of *P. virgatum* functional leaves

不同字母表示同一生育时期不同处理之间的显著性差异,显著水平为 0.05,下同。Different letters indicate significant differences between different treatments in the same fertility period, with a significant level of 0.05, the same below.

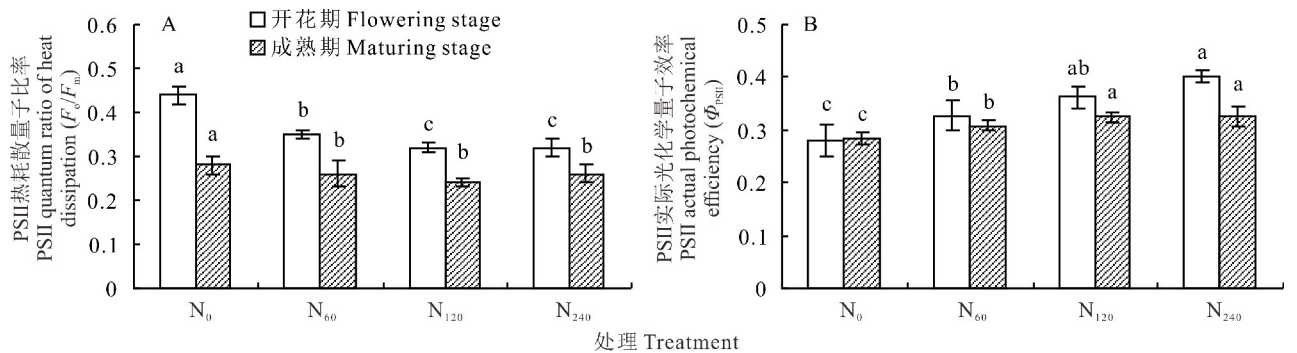


图 2 柳枝稷叶片的 PS II 热耗散量子比率和实际光化学量子效率

Fig. 2 PS II quantum ratio of heat dissipation and actual photochemical efficiency of *P. virgatum* functional leaves

2.1.3 施氮量对柳枝稷叶片的 PS II 光化学猝灭系数和非光化学猝灭系数的影响 柳枝稷叶片的 PS II 光化学猝灭系数(qP)随着施氮量的增加而呈现递增的趋势(图 3A)。在开花期,柳枝稷叶片 qP 在 N_{240} 处理下最大,为 0.64,显著高于其他各施氮处理($P < 0.05$)。 N_{60} 、 N_{120} 和 N_{240} 较 N_0 处理分别提高了 3.45%、3.46% 和 10.34%,其中 N_{60} 和 N_{120} 处理之间没有显著差异($P > 0.05$)。在柳枝稷成熟期,叶片的 qP 在 N_{240} 处理下最大,为 0.66,显著高于其他各施氮处理($P < 0.05$)。 N_{60} 、 N_{120} 和 N_{240} 较 N_0 处理分别提高了 3.23%、3.24% 和 6.45%,其中 N_{60} 和 N_{120} 处理之间差异不显著($P > 0.05$)。

柳枝稷叶片的 PS II 非光化学猝灭系数(NPQ)随着施氮量的增加而显著升高($P < 0.05$) (图 3B)。在开花期,柳枝稷叶片的 NPQ 在 N_{240} 处理下最大,为 0.39,显著高于 N_0 和 N_{60} 处理($P < 0.05$)。与 N_0 处理相比, N_{60} 、 N_{120} 和 N_{240} 柳枝稷叶片的 NPQ 分别提高了 13.33%、16.67% 和 30.01%,其中 N_0 和 N_{60} 处理之间与 N_{120} 和 N_{240} 处理之间均没有显著差异($P > 0.05$)。在柳枝稷成熟期,叶片的 NPQ 在 N_{240} 处理下最大,为 0.45,显著高于其他各施氮处理($P < 0.05$)。 N_{60} 、 N_{120} 和 N_{240} 较 N_0 处理分别提高了 5.56%、8.33% 和 25.02%。

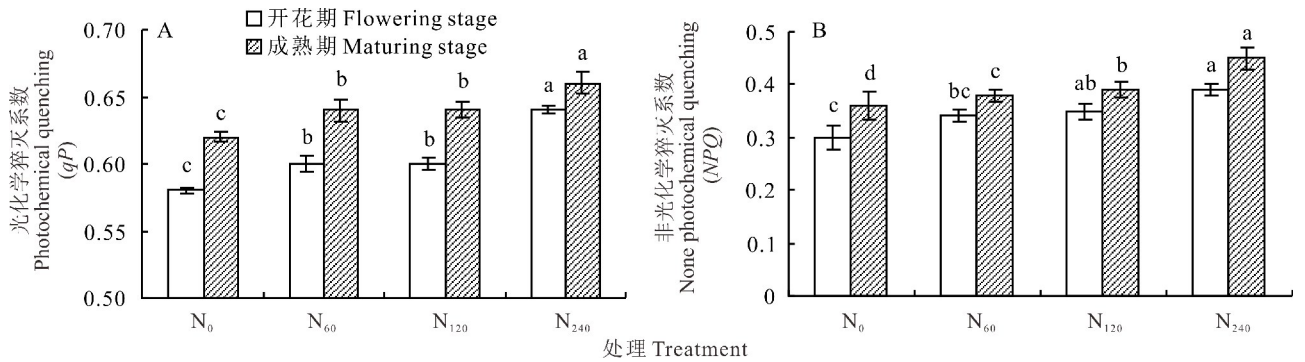


图3 柳枝稷叶片的 PS II 光化学猝灭系数和非光化学猝灭系数

Fig. 3 PS II photochemical quenching coefficient and none photochemical quenching coefficient of *P. virgatum* functional leaves

2.2 不同施氮水平对柳枝稷干物质积累及构成比例的影响

随着生育时期的推进,柳枝稷地上部干物质积累量逐渐上升(表1)。除 N₆₀ 处理外,均在灌浆期达到最大值,之后趋于平稳,然后略有下降;而干物质积累随着施氮量的增加均有不同程度的提高。其中,干物质积累量均在 N₂₄₀ 处理下达到峰值,分别为 25.32(返青期)、134.13(拔节期)、263.56(孕穗期)、331.45(开花期)、378.13(灌浆期)和 372.47 g·穴⁻¹(成熟期),均显著高于 N₀ 处理(P<0.05)。返青期,与 N₀ 处理相比,N₆₀ 和 N₁₂₀ 处理下柳枝稷干物质积累量略有提高,但是三者之间均未达到显著水平(P>0.05);拔节期,N₆₀、N₁₂₀ 和 N₂₄₀ 处理下,柳枝稷干物质积累较 N₀ 均显著提高(P<0.05),且分别提升了 9.26%、19.63%和 39.15%;孕穗期,与 N₀ 处理相比,N₆₀、N₁₂₀ 和 N₂₄₀ 处理下柳枝稷干物质积累均显著增加(P<0.05),分别提高了 7.30%、17.60%和 21.24%;开花期,与 N₀ 处理相比,N₁₂₀ 和 N₂₄₀ 处理下柳枝稷干物质积累均显著增加(P<0.05),分别提高了 12.41%和 16.28%,其中 N₆₀ 与 N₀ 处理之间差异不显著(P>0.05);灌浆期,N₆₀、N₁₂₀ 和 N₂₄₀ 处理下,柳枝稷干物质积累较 N₀ 处理均显著增加(P<0.05),分别提高了 3.53%、15.93%和 24.33%;成熟期,N₆₀、N₁₂₀ 和 N₂₄₀ 处理下,柳枝稷干物质积累与 N₀ 处理相比均显著增加(P<0.05),分别提高了 6.35%、15.70%和 24.52%。

表1 不同施氮水平下柳枝稷干物质积累

Table 1 Dry matter accumulation of *P. virgatum* under different nitrogen application rate (g·hole⁻¹)

施氮量 Nitrogen application	返青期 Green stage	拔节期 Jointing stage	孕穗期 Booting stage	开花期 Flowering stage	灌浆期 Filling stage	成熟期 Maturing stage
N ₀	14.52±0.96b	96.39±2.62d	217.38±3.09d	285.04±4.02c	304.13±3.10d	299.12±2.97d
N ₆₀	14.73±0.84b	105.32±1.11c	233.24±1.93c	293.36±6.47c	314.86±5.29c	318.12±2.34c
N ₁₂₀	16.39±0.89b	115.31±2.94b	255.64±2.88b	320.41±4.93b	352.59±7.62b	346.08±4.04b
N ₂₄₀	25.32±1.81a	134.13±0.89a	263.56±4.43a	331.45±4.58a	378.13±3.93a	372.47±6.74a

注:同列数字后面不同字母表示不同处理之间的显著性差异,显著水平为 0.05。

Note: Different letters following the same column of numbers indicate significant differences between different treatments, with a significance level of 0.05.

随着施氮量的增加,柳枝稷茎对其地上部干物质积累的贡献逐渐降低,叶和穗对其干物质积累的贡献逐渐升高,但不同施氮量下,柳枝稷茎、叶和穗对其地上部干物质积累的贡献之间没有显著性差异(P>0.05)(图4)。其中 N₀ 处理下,柳枝稷茎对其地上部干物质积累的贡献最大,为 62.17%。N₁₂₀ 处理下柳枝稷叶对其地上部干物质积累的贡献最大,为 22.36%。N₂₄₀ 处理下,柳枝稷穗对其地上部干物质积累的贡献最大,为 11.42%。

2.3 柳枝稷叶绿素荧光与干物质积累量灰色关联度评价

由于不同叶绿素荧光参数与积累量指标对柳枝稷的贡献不同,如果将所有指标进行等权赋值,其结果可能会存在一定的偏差,试验结果的可靠性有待考究。因此,将各个指标赋予不同权重更具有参考意义,增加试验的可靠性。本研究主要是通过变异系数法对柳枝稷叶片叶绿素荧光参数与干物质积累量进行非等全赋值,由此计算出来的各叶绿素荧光指标与干物质积累量所占的权重(表 2)。

根据无量纲化处理结果,计算求得参考数据列与比较数据列的绝对差值、最小二级差和最大二级差,即最小二级差为 0,最大二级差为 0.54,代入公式(1)和(2)中,求得其加权关联度和等权关联度(表 3)。不同施氮水平下柳枝稷等权关联度和加权关联度之间存在较小差异,叶绿素荧光和干物质积累的综合表现结果一致,说明其结果是可靠的。根据灰色关联度分析原则,关联度越大,说明与理想指标的相似度越高,叶绿素荧光综合表现越优,与干物质积累量之间关系更为密切。 N_{240} 处理下,柳枝稷叶绿素荧光参数与干物质积累量之间加权关联度最大,为 0.986,叶绿素荧光综合表现优良,其他各氮肥处理下柳枝稷的综合表现依次为: $N_{120} > N_{60} > N_0$ 。

3 讨论

氮作为植物生长所必需的大量营养元素,是构成各种重要有机化合物不可缺少的组成部分。施氮量对植物的生长、叶绿素含量、光合特性及叶绿素荧光参数都有较大影响^[18]。霍丽娟等^[19]研究表明,干旱胁迫条件下施氮显著提高了混播柳枝稷的 Φ_{PSII} 和 qP ,提高了柳枝稷的光合能力和抗旱生态适应性。孙扬等^[20]研究表明,在吉林西部半干旱区,随着施氮量的增加,玉米(*Zea mays*)叶片 F_v/F_m 、 qP 增加,但 300、400 $kg \cdot hm^{-2}$ 施氮量下 F_v/F_m 、 qP 无显著差异,说明当氮肥达到一定的水平时,继续增加氮肥施用量对 F_v/F_m 、 qP 影响不大。本试验研究结果表明,与 N_0 处理相比, N_{60} 、 N_{120} 和 N_{240} 处理的 PS II 最大光化学效率(F_v/F_m)、PS II 实际光化学量子效率(Φ_{PSII})、潜在活性(F_v/F_o)、光化学猝灭系数(qP)、非光化学猝灭系数(NPQ)显著升高,而热耗散量子比率(F_v/F_o)逐渐降低,这说明施氮能够提高 PS II 反应中心开放比例,从而提高其原初光能转换效率,减少对吸收光能的热耗散,有利于提高柳枝稷的光合能力^[19]。柳枝稷孕穗期后随着施氮量的增加, F_v/F_m 略有降低,但 N_{60} 、 N_{120} 和 N_{240} 各处理之间并无显著差异,这有可能是由于 N_{240} 处理使柳枝稷

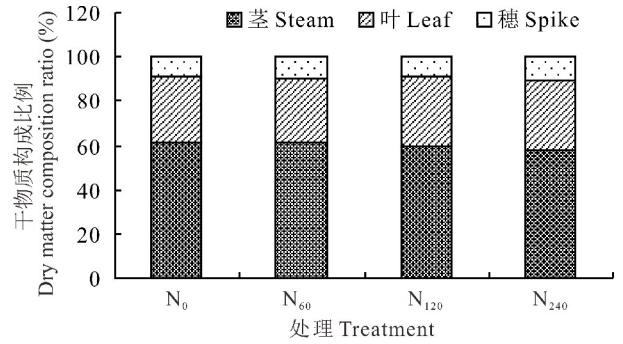


图 4 柳枝稷干物质构成比例

Fig. 4 Dry matter proportion of *P. virgatum*

表 2 柳枝稷叶绿素荧光指标与干物质积累、变异系数及权重

Table 2 Chlorophyll fluorescence index, dry matter accumulation, variation coefficient and weight of *P. virgatum*

指标 Index	平均值 Mean value	标准差 Standard deviation	变异系数 Variable coefficient	权重 Weight
F_o/F_m	0.36	0.06	0.16	0.14
F_v/F_o	1.83	0.38	0.21	0.18
F_v/F_m	0.64	0.06	0.09	0.08
qP	0.61	0.03	0.04	0.04
NPQ	0.35	0.04	0.11	0.09
Φ_{PSII}	0.31	0.02	0.06	0.07
干物质积累 accumulation ($t \cdot hm^{-2}$)	18.64	4.97	0.27	0.23

注:表中所有数据均以柳枝稷成熟期数据为基础计算求得的。

Note: All data were calculated based on the data of *P. virgatum* maturing stage.

表 3 不同施氮水平下柳枝稷叶绿素荧光与干物质积累关联度

Table 3 Correlation between chlorophyll fluorescence and dry matter accumulation of *P. virgatum* under different nitrogen application rate

施氮量 Nitrogen application	加权关联度 Weighted relational degree	位次 Precedence	等权关联度 Equal right correlation degree	位次 Precedence
N_0	0.512	4	0.545	4
N_{60}	0.687	3	0.720	3
N_{120}	0.859	2	0.865	2
N_{240}	0.986	1	0.998	1

PS II 的潜在活性中心受损,抑制了光合作用的原初反应过程,从而影响了光合电子从PS II 反应中心向库、源的传递过程,导致了 F_v/F_m 降低^[20-22]。

氮素是柳枝稷生长最为重要的营养元素之一。禾本科牧草的生长发育往往依靠植物根系从土壤中吸收的氮素来维持,但土壤中可利用的氮素通常难以满足禾本科牧草高产优质的需要,施用氮肥被认为是补充土壤氮素以提高牧草产量的重要手段^[23]。大量的研究表明,氮肥可以显著提高柳枝稷的产量^[24-25],不同地区柳枝稷施氮效果差异较大,在美国南部地区氮肥施用量为 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时柳枝稷产量较高,在黄土高原半干旱地区施氮量为 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时柳枝稷干物质产量最高,过量施氮反而不利于柳枝稷产量的提高^[26]。本试验中,在无氮添加 ($0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, N_0)、低氮 ($60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, N_{60})、中氮 ($120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, N_{120}) 和高氮 ($240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, N_{240}) 4 个施肥水平下,柳枝稷干物质积累量随着施氮水平的增加而显著增加,其中柳枝稷各生育时期内均在施高氮 ($240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, N_{240}) 水平下干物质积累量最高,显著高于其他施氮处理,这与陶梦等^[27]和徐艳霞等^[28]研究结果不一致,可能是由于不同区域的气候、土壤、环境、柳枝稷品种以及水分管理有差异。张永乾^[29]研究了宁夏银北地区柳枝稷的生态适应性,结果表明茎对地上部干物质积累的贡献最大,平均贡献率为 61.35%,其次是穗,平均贡献率为 24.91%,最后是叶片,平均贡献率为 13.74%。本研究表明,柳枝稷地上部干物质积累量的构成中,茎对地上部干物质积累的贡献最大,平均贡献率为 60.26%,其次是叶片,平均贡献率为 34.95%,最后是穗,平均贡献率为 4.79%。这说明施氮促进了植物体的营养生长,提高了茎叶的产量和比例,进而提高其地上部干物质积累。

4 结论

施氮能显著影响柳枝稷叶片叶绿素荧光动力学参数特征变化;同时在盐碱条件下,施氮可以显著提高柳枝稷地上部干物质积累。在不施氮处理下,柳枝稷叶片主要的荧光参数均表现为较低水平,随着施氮量的增加,叶绿素荧光参数和干物质积累整体呈上升的趋势。综合来看,本试验条件下,柳枝稷施纯 N $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 能够提升柳枝稷叶片光合能力,促进茎、叶干物质积累,从而提高柳枝稷地上部干物质产量。

参考文献 References:

- [1] Xu S N, Fan L X, He Y, *et al.* Effects of different nitrogen application rates on the growth and photosynthetic fluorescence characteristics of zoysiagrass. *Soil and Fertilizer Science in China*, 2013, (5): 46-50.
徐苏男, 范丽霞, 何月, 等. 不同施氮量对结缕草生长及光合荧光特性的影响. *中国土壤与肥料*, 2013, (5): 46-50.
- [2] Li L L, Fang W P, Xie D Y, *et al.* Effects of nitrogen application rate on photosynthetic physiological characteristics, yield and quality of hybrid cotton. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(5): 1183-1189.
李伶俐, 房卫平, 谢德意, 等. 施氮量对杂交棉光合生理特性及积累量、品质的影响. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(5): 1183-1189.
- [3] Wu W M, Chen H J, Li J C, *et al.* Effects of nitrogen application strategies on chlorophyll fluorescence and grain filling characteristics of winter wheat in the booting stage. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(6): 1088-1096.
武文明, 陈洪俭, 李金才, 等. 氮肥运筹对成熟期受渍冬小麦旗叶叶绿素荧光与籽粒灌浆特性的影响. *作物学报*, 2012, 38(6): 1088-1096.
- [4] Jiao Y J, Yin C Y, Chen K. Effects of soil water and nitrogen supply on photosynthetic characteristics of *Jatropha curcas* seedlings. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(1): 91-99.
焦玉娟, 尹春英, 陈珂. 土壤水、氮供应对麻疯树幼苗光合特性的影响. *植物生态学报*, 2011, 35(1): 91-99.
- [5] Jiang H M, Zhang J F, Yang J C, *et al.* Effects of different nitrogen fertilizer application on tomato yield, quality and soil nitrate nitrogen accumulation in facilities. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(12): 2338-2345.
姜慧敏, 张建峰, 杨俊诚, 等. 不同氮肥用量对设施番茄积累量、品质和土壤硝态氮累积的影响. *农业环境科学学报*, 2010, 29(12): 2338-2345.
- [6] Xiang F, Li W, Liu H Y, *et al.* Effects of nitrogen levels on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics of different tea plants. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2018, 38(6): 1138-1145.
向芬, 李维, 刘红艳, 等. 氮素水平对不同品种茶树光合及叶绿素荧光特性的影响. *西北植物学报*, 2018, 38(6): 1138-1145.
- [7] Li Q, Luo Y H, Yu D H, *et al.* Effects of low nitrogen stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics of low nitrogen tolerant maize varieties. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2015, 21(5): 1132-1141.

- 李强, 罗延宏, 余东海, 等. 低氮胁迫对耐低氮玉米品种苗期光合及叶绿素荧光特性的影响. 植物营养与肥科学报, 2015, 21(5): 1132—1141.
- [8] Tan X L, Guo T W, Zhang G H, *et al.* Effects of nitrogen on chlorophyll fluorescence parameters in different leaf positions of wheat. *Journal of Triticeae Crops*, 2009, 29(3): 437—441.
谭雪莲, 郭天文, 张国宏, 等. 氮素对小麦不同叶位叶片叶绿素荧光参数的调控效应. 麦类作物学报, 2009, 29(3): 437—441.
- [9] Hao X Y, Han X, Li P, *et al.* Effects of elevated atmospheric CO₂ concentration on photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of green bean leaves. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(10): 2776—2780.
郝兴宇, 韩雪, 李萍, 等. 大气 CO₂ 浓度升高对绿豆叶片光合作用及叶绿素荧光参数的影响. 应用生态学报, 2011, 22(10): 2776—2780.
- [10] Ye Z P, Hu W H, Yan X H. Comparison on light-response models of actual photochemical efficiency in photosystem II. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2016, 40(11): 1208—1217.
叶子飘, 胡文海, 闫小红. 光系统 II 实际光化学量子效率对光的响应模型比较. 植物生态学报, 2016, 40(11): 1208—1217.
- [11] Yan Y H, Yang W Y, Zhang X Q, *et al.* Effects of nitrogen application amount on photosynthetic characteristics, dry matter accumulation and yield after interplanting soybean. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20(3): 233—238.
闫艳红, 杨文钰, 张新全, 等. 施氮量对套作大豆花后光合特性、干物质积累及产量的影响. 草业学报, 2011, 20(3): 233—238.
- [12] Liu X J, Liu Y N, Kuai J L, *et al.* Effects of nitrogen supply levels on alfalfa accumulation and quality. *Acta Agrestia Sinica*, 2013, 21(4): 702—707.
刘晓静, 刘艳楠, 蒯佳林, 等. 供氮水平对不同紫花苜蓿积累量及品质的影响. 草地学报, 2013, 21(4): 702—707.
- [13] Huang J, Gao Z J, Wang S Q, *et al.* Effects of nitrogen on tillering stage and photosynthetic physiological characteristics of switchgrass. *Chinese Journal of Grassland*, 2018, 40(6): 10—17.
黄瑾, 高志娟, 王世琪, 等. 氮素对分蘖期干旱及复水柳枝稷光合生理特性的影响. 中国草地学报, 2018, 40(6): 10—17.
- [14] Liu J L, Zhu W B, Xie G H, *et al.* Research progress on energy crops switchgrass. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, 18(3): 232—240.
刘吉利, 朱万斌, 谢光辉, 等. 能源作物柳枝稷研究进展. 草业学报, 2009, 18(3): 232—240.
- [15] Danielle C, Hyemi K, Lauren Q, *et al.* Switchgrass as a bioenergy crop in the Loess Plateau, China: Potential lignocellulosic feedstock production and environmental conservation. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(6): 1211—1226.
- [16] Chang W W, Liu J L, Wu N, *et al.* Comparison of photosynthetic characteristics and yield of different switchgrass cultivars in saline-alkali regions in Northwest China. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2019, 31(10): 1647—1654.
常雯雯, 刘吉利, 吴娜, 等. 西北盐碱地区不同柳枝稷品种光合特性与积累量比较. 浙江农业学报, 2019, 31(10): 1647—1654.
- [17] Deng J L. Course of grey system theory. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1990.
邓聚伦. 灰色系统理论教程. 武汉: 华中科技大学出版社, 1990.
- [18] Long J R, Ma G H, Wan Y Z, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer level on chlorophyll fluorescence characteristic in flag leaf of super hybrid rice at late growth stage. *Chinese Journal of Rice Science*, 2011, 25(5): 501—507.
龙继锐, 马国辉, 万宜珍, 等. 施氮量对超级杂交中稻生育后期剑叶叶绿素荧光特性的影响. 中国水稻科学, 2011, 25(5): 501—507.
- [19] Huo L J, Ding W L, Gao Z J, *et al.* Chlorophyll fluorescence parameters and response characteristics to water and nitrogen conditions of switchgrass under mixed seeding. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2016, 36(4): 757—765.
霍丽娟, 丁文利, 高志娟, 等. 混播下柳枝稷叶绿素荧光参数及对水氮条件的响应特征. 西北植物学报, 2016, 36(4): 757—765.
- [20] Sun Y, Wu C S, Gu Y. Effects of nitrogen fertilizer on chlorophyll fluorescence characteristics and yield of corn leaves under membrane drip irrigation in semi-arid area. *Journal of Maize Sciences*, 2017, 25(1): 133—138, 146.
孙扬, 吴春胜, 谷岩. 氮肥对半干旱区膜下滴灌玉米叶片叶绿素荧光特性及产量的影响. 玉米科学, 2017, 25(1): 133—138, 146.
- [21] Bai Z Y, Li C D, Zhao J F, *et al.* Effects of drought stress on chlorophyll fluorescence parameters and chromosome effects of wheat substitution lines. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(1): 47—57.
白志英, 李存东, 赵金锋, 等. 干旱胁迫对小麦代换系叶绿素荧光参数的影响及染色体效应初步分析. 中国农业科学, 2011, 44(1): 47—57.
- [22] Kouki H. Interspecific difference in the photosynthesis-nitrogen relationship: Patterns, physiological causes, and ecological

- importance. *Journal of Plant Research*, 2004, 117: 481–494.
- [23] Hong C O, Owens V N, Bransby D, *et al.* Switchgrass response to nitrogen fertilizer across diverse environments in the USA: A regional feedstock partnership report. *Bioenergy Research*, 2014, 7(3): 777–788.
- [24] Kimura E, Collins H P, Fransen S. Biomass production and nutrient removal by switchgrass under irrigation. *Agronomy Journal*, 2015, 107(1): 204–210.
- [25] Pang L D, Li W J, Zhu J Z. Effects of topdressing nitrogen fertilizer on photosynthetic characteristics and seed yield of Sudan grass. *Pratacultural Science*, 2014, 31(12): 2286–2292.
庞立东, 李卫军, 朱进忠. 追施氮肥对苏丹草光合特性及种子产量的影响. *草业科学*, 2014, 31(12): 2286–2292.
- [26] Liu J L, Wu N. Effects of nitrogen application on biomass yield and utilization characteristics of water and fertilizer from switchgrass. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2014, 23(7): 166–171.
刘吉利, 吴娜. 施氮量对柳枝稷生物质产量和水肥利用特性的影响. *西北农业学报*, 2014, 23(7): 166–171.
- [27] Tao M, Wang T M, Su D R, *et al.* Effect of nitrogen fertilizer on the target yield of switchgrass in Kubuqi Sand. *Journal of Beijing Forestry University*, 2017, 39(7): 87–95.
陶梦, 王铁梅, 苏德荣, 等. 氮肥对库布齐沙地柳枝稷目标产量的影响. *北京林业大学学报*, 2017, 39(7): 87–95.
- [28] Xu Y X, Ding X Y, Huang X Y, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer level on biological yield and quality of silage maize in mildly saline-alkali land. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2017, (10): 181–183.
徐艳霞, 丁昕颖, 黄新育, 等. 轻度盐碱地氮肥水平对青贮玉米生物产量和品质的影响. *黑龙江畜牧兽医*, 2017, (10): 181–183.
- [29] Zhang Y Q. Study on the adaptability of switchgrass in saline-alkali land in Yinbei area of Ningxia. Yinchuan: Ningxia University, 2018.
张永乾. 宁夏银北地区盐碱地柳枝稷适应性研究. 银川: 宁夏大学, 2018.