

草地早熟禾氮代谢及与根茎扩展的相关性研究

袁娅娟,白小明,朱雅楠,张毓婧,闫玉邦,张才忠,李玉杰

(甘肃农业大学草业学院,草业生态系统教育部重点实验室,甘肃省草业工程实验室,中-美草地畜牧业可持续发展研究中心,甘肃 兰州 730070)

摘要:为明确草地早熟禾(*Poa pratensis*)含氮化合物在不同生育时期的变化规律及与根茎扩展的关系,对根茎扩展能力存在显著差异的3个野生草地早熟禾材料(LZYZ、DXWY和DXAD)不同生育时期根茎扩展及氮代谢相关指标进行测定。结果表明,草地早熟禾根茎扩展主要集中在返青期至抽穗期,该阶段LZYZ、DXWY和DXAD分蘖数分别增加176.08%、127.13%和65.90%;根茎数分别增加662.14%、544.94%和429.41%。拔节期至抽穗期是地上生物量快速积累阶段,该阶段3个材料地上生物量绝对增长率分别为136.22、78.71、68.33 g/(株·d);根茎生物量有两个快速积累时期,拔节期至抽穗期3个材料根茎生物量绝对增长率分别为26.33、13.48、4.42 g/(株·d);成熟期至枯黄期,3个材料分别为45.39、35.11、16.26 g/(株·d)。硝态氮(NO_3^- -N)含量与硝酸还原酶(NR)活性随生育时期推进呈单峰曲线变化,峰值分别出现在拔节期和抽穗期;游离氨基酸含量呈“升-降-升”的变化规律,峰值出现在抽穗期,在枯黄期有所上升;谷氨酰胺合成酶(GS)和谷氨酸合成酶(GOGAT)活性均呈双峰曲线变化,峰值出现时期分别为抽穗期和成熟期;谷氨酸脱氢酶(GDH)活性生长前期较低,开花期迅速上升,在成熟期达最大值,枯黄期仍保持较高活性。相关性分析显示,草地早熟禾根茎扩展各指标增长率与 NO_3^- -N、游离氨基酸、NR、GS和GOGAT极显著或显著正相关,与GDH活性负相关。因此,草地早熟禾根茎中硝态氮和游离氨基酸含量越多,NR、GS和GOGAT活性越高、GDH活性越低,越有利于根茎扩展。

关键词:草地早熟禾;根茎扩展;氮代谢;动态变化;相关性

中图分类号:S688.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2022)03-0035-10

DOI: 10.13817/j.cnki.cyycp.2022.03.005



草坪是城市绿化中种植面积最大的地被植物,作为多年生禾本科植物,草地早熟禾(*Poa pratensis*)因其绿期长、再生能力和耐修剪性强的特性,成为人工草

坪的重要组成成分^[1]。作为典型的根茎型禾草,通过根茎不断产生新的分蘖株来进行种群扩充,是草地早熟禾再生能力强的关键所在^[2-3]。氮在植物生命活动中占据首要地位,堪称生命元素,是叶绿体、核酸、蛋白质以及很多次生代谢产物的重要组成成分^[4]。氮素对于植株的器官建成、生理代谢、干物质生产和种子产量的形成都起着重要作用^[5-6]。因此,了解草地早熟禾氮代谢规律对草坪草的建植与养护管理具有十分重要的现实意义。

氮代谢是植物体内最基本的两大代谢过程之一,研究植物氮代谢产物及其相关酶活性在不同环境下的动态趋势,能在一定程度上反映植株对环境的响应

收稿日期:2021-04-12; **修回日期:**2021-06-07

基金项目:国家自然科学基金(31560667);甘肃省林草局草原生态修复治理科技支撑项目(GSLC-2020-3);甘肃省科技计划(20JR10RA564);中国科协产业发展服务项目(2021XHQB002)

作者简介:袁娅娟(1995-),女,甘肃庆阳人,硕士研究生。

E-mail:1239412646@qq.com;

白小明为通信作者。

E-mail:baixm@gsau.edu.cn

与调节能力^[7]。酶作为代谢网络运行的调控单元,对代谢控制至关重要。硝酸还原酶是氮素同化的第一个酶,也是限速酶,谷氨酰胺合成酶(GS)、谷氨酸合成酶(GOGAT)和谷氨酸脱氢酶(GDH)参与氮代谢调节,GS/GOGAT循环实现了无机氮的有机化,它们共同构成氮代谢运转与循环^[8]。Brain等^[9]认为氮素通过两条途径调节植物生长发育,一是调节植物体内营养水平进而影响发育,二是通过一系列信号物质调节植物代谢。已有研究证实,小麦植株体内氮代谢与分蘖发生、衰亡及其成穗密切相关^[10]。杨文钰等^[11]发现,营养代谢水平对分蘖成穗具有重要作用,小麦生育前期旺盛的碳代谢、生育后期旺盛的氮代谢均有利于分蘖的发生。关于草地早熟禾的相关研究表明,单一氮素条件供给下,适量施氮可提高草地早熟禾细胞抗氧化能力、草坪质量,并促进其生长^[12-13];水氮互作条件下,适量灌水和氮肥施用对推迟草地早熟禾枯黄和提前返青有显著作用^[14]。目前,对于氮素的研究热点集中在氮素添加对植物的影响^[15-16]以及土壤氮储量上^[17-18],对于小麦和水稻的氮素动态变化规律也有研

究,但时期大多集中在花后或籽粒灌浆期^[19,21],有关草地早熟禾返青后各生育时期内氮代谢酶活性的研究报道较少。为此本研究以根茎扩展能力不同的3个野生草地早熟禾为材料,在大田栽培条件下,通过对6个连续生育时期的根茎扩展及氮代谢指标的测定,探究含氮化合物与根茎扩展的相关性,以期为草地早熟禾根茎扩展调控机理及合理施肥提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验地位于甘肃省兰州市甘肃农业大学草坪实训基地内,E 103°3'、N 36°48',属于中温带气候区,平均海拔 1 517 m,年平均气温 10 °C,年均降水量 362 mm,年蒸发量 1 623 mm。土壤以壤土为主,土层深厚。土壤基础理化性状:有机质 2.34%,速效氮 40.37 mg/kg,速效磷 45.62 mg/kg,速效钾 75.3 mg/kg,pH值为 7.5。

1.2 试验材料

试验材料为3个根茎扩展能力不同的野生草地早熟禾,采自甘肃境内(表1)。

表1 供试3个野生草地早熟禾

Table 1 Materials information of 3 tested *Poa pratensis*

编号	材料名称	采集地	海拔/m	地理坐标	生境	根茎扩展能力
LZYZ	草地早熟禾(榆中)	甘肃省兰州市榆中县	1 965	N 35°48' E 104°04'	沟底	强
DXWY	草地早熟禾(渭源)	甘肃省定西市渭源县	2 401	N 35°02' E 104°05'	路边	中
DXAD	草地早熟禾(安定)	甘肃省定西市安定区	2 035	N 35°58' E 104°62'	山坡	弱

1.3 试验设计

试验采取大田种植方式,播前施磷酸二铵 30 g/m²作为底肥,于2019年6月12日种植于甘肃农业大学草坪实训基地。采用株行距 70 cm×70 cm进行穴播,每穴约 50粒种子。出苗两周后第1次间苗,3周后第二次间苗,5周后选取生长健壮,均匀一致,无病虫害的植株定苗。以试验地内 50%植株外部形态发生显著变化为标准,分别于种植第2年的返青期、拔节期、抽穗期、开花期、成熟期和枯黄期进行6次取样,取样时间 9:00~11:00。其中每个材料取 8株,用蒸馏水洗净并吸干水分,4株用于根茎扩展指标测定;其余4株全部取一级根茎,将其称重、锡箔纸包裹,液氮迅速冷冻后置于-80 °C超低温冰箱保存,用于相关生理

指标测定。

1.4 指标测定与方法

1.4.1 分蘖数 测定草地早熟禾地面枝条的数量,用蘖/株表示。

1.4.2 根茎数 测定草地早熟禾地下根茎数,用个/株表示。

1.4.3 地上和根茎生物量 采用烘干称重法,将地上与地下根茎分开,洗净,置于 105 °C杀青 30 min,70 °C烘干至恒重,电子天平称其干重,用 g/株表示。

1.4.4 硝态氮含量、游离氨基酸含量和硝酸还原酶活性 参照《植物生理学实验指导》测定^[22]。

1.4.5 谷氨酰胺合成酶(GS)、谷氨酸合酶、谷氨酸脱氢酶活性 参照王小纯等^[23]的方法测定,以单位时间内每 mg 样品 540 nm 处的吸光值表示 GS 活性,单位为

A/(g·h);以单位时间内每 g 样品催化 NADH 的微摩尔数表示 GOGAT 和 GDH 活性,单位为 $\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{min})$ 。

1.4.6 生物量增长率 用绝对增长率(AGR)表示,计算公式如下^[24]:

$$\text{AGR}=(W_{i+1}-W_i)/(t_{i+1}-t_i)$$

式中: W_i 、 W_{i+1} 分别表示 t_i 、 t_{i+1} 时刻的生物量。

1.5 数据分析

采用 SPSS 26.0 软件,用 Duncan 法进行方差分析和差异显著性检验,Excel 2019 绘制图表,试验结果为 3 次重复的平均值。

2 结果与分析

2.1 草地早熟禾根茎扩展指标动态变化

2.1.1 分蘖数与根茎数动态变化 随生育时期推进,3 个材料分蘖数变化规律一致,均呈逐渐增加趋势(图 1-A)。返青期分蘖数最少,LZYZ、DXWY 和 DXAD 分别为 361.00、290.00、217.00 蘖/株,LZYZ 比 DXWY 和 DXAD 高 22.48% 和 66.36%;3 个材料分蘖数在枯黄期均达最大值,分别为 1 196.00、827.33、440.00 蘖/株,LZYZ 比 DXWY 和 DXAD 高

44.56% 和 171.82%。返青期至抽穗期是草地早熟禾分蘖数快速增长时期,抽穗期 3 个材料分别较返青期增加了 176.08%、127.13% 和 65.90%;开花期后草地早熟生长速率减缓,至枯黄期 3 个材料仅增加 4.73%、9.80% 和 7.98%。

根茎数变化规律与分蘖数一致,随着生育时期推进均呈渐增趋势(图 1-B)。在返青期根茎数最少,LZYZ、DXWY 和 DXAD 分别为 115.33、75.67、45.33 个/株,LZYZ 比 DXWY 和 DXAD 高 52.42% 和 154.41%;返青期后持续上升直至枯黄期达整个生育时期最大值,此时 3 个材料分别为 1 131.00、626.33、347.00 个/株,LZYZ 比 DXWY 和 DXAD 高 80.57% 和 225.94%。返青期至抽穗期是根茎数快速增加时期,相比于返青期,抽穗期 3 个材料分别增加 662.14%、544.94% 和 429.41%;开花期后增长速率逐渐下降,至枯黄期 3 个材料仅增加 15.88%、20.91% 和 20.91%。方差分析显示,整个生育时期内,分蘖数 LZYZ 与 DXAD 差异均不显著,根茎数除返青期、拔节期、抽穗期 LZYZ 与 DXAY 差异显著外,其余均差异不显著。

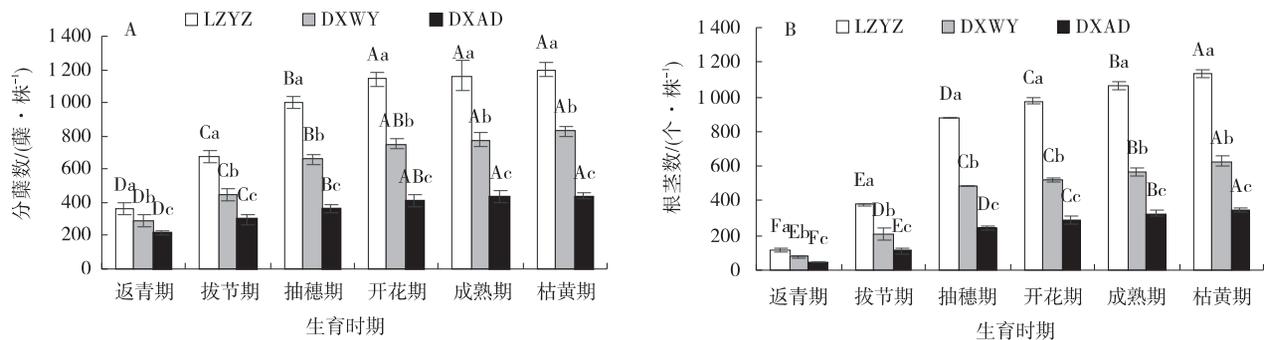


图 1 不同生育时期分蘖数与根茎数

Fig. 1 Dynamic changes of tiller number and rhizome number

注:图中不同大写字母表示同一材料不同生育时期差异显著;不同小写字母表示同一时期不同材料间差异显著,下同

2.1.2 地上生物量动态变化 供试草地早熟禾地上生物量随生育时期推进变化趋势一致,均呈单峰曲线变化,自返青期后持续上升,在成熟期达到峰值,之后迅速下降(图 2-A)。返青期,3 个材料地上生物量均处于最小值,LZYZ、DXWY 和 DXAD 分别为 21.94、20.49、8.59 g/株,LZYZ 比 DXWY 和 DXAD 高 7.08% 和 155.55%;成熟期,3 个材料地上生物量分别为 232.23、162.80、136.26 g/株,LZYZ 比 DXWY 高 42.65%,比 DXAD 高 70.43%;成熟期后 3 个材料地上生物量迅速下降,分别减少 24.23%、

36.02% 和 56.23%;枯黄期 LZYZ 比 DXWY 高 68.94%,比 DXAD 高 195.04%。方差分析显示,LZYZ 与 DXWY 整个生育时期中除成熟期差异不显著外($P>0.05$),其他时期差异显著($P<0.05$),LZYZ 与 DXWY 除开花期和枯黄期差异显著外,其他时期差异不显著。且均表现为 LZYZ>DXWY>DXAD。

草地早熟禾地上生物量绝对增长率随生育时期推进呈单峰曲线变化,成熟期前为正值,成熟期后为负值(图 2-B)。峰值出现在拔节期至抽穗期,先于地

上生物量达到最大值,3个材料分别为136.22、78.71、68.33 g/(株·d),LZYZ明显高于DXWY和DXAD。

抽穗期后逐渐减小,于成熟期后出现负值,3个材料分别为-56.27、-58.64、-76.62 g/(株·d)。

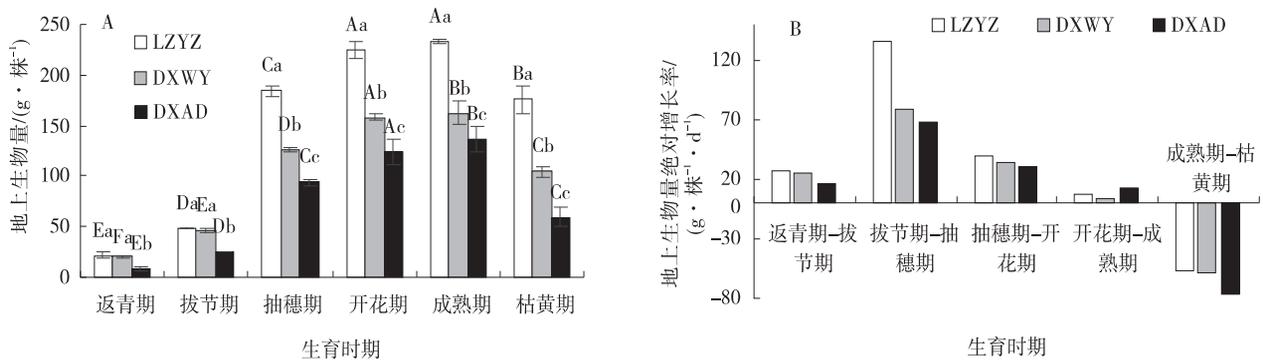


图2 不同生育时期地上生物量及绝对增长率

Fig. 2 Dynamic changes of aboveground biomass and absolute growth rate

2.1.3 根茎生物量动态变化 供试草地早熟禾根茎生物量随生育时期推进与地上生物量的变化有所不同,但3个材料间变化趋势一致,均呈“升-降-升”的“N”字型曲线(图3-A)。返青期根茎生物量最低,LZYZ、DXWY和DXAD分别为2.35、1.68、0.80 g/株;随生育时期推进持续上升至开花期达第1个峰值,此时LZYZ比DXWY高75.82%,比DXAD高423.89%;开花期至成熟期3个材料均下降,LZYZ和DXAD分别从33.42 g/株下降至29.67 g/株,6.38 g/株下降至4.54 g/株,两个生育时期间均差异不显著($P>0.05$),DXWY从19.01 g/株下降至8.94 g/株,差异显著($P<0.05$);在枯黄期3个材料根茎生物量迅

速增加,达整个生育时期最大值,LZYZ、DXWY和DXAD分别为75.06、44.04、20.80 g/株。方差分析显示,整个生育时期LZYZ均显著高于DXWY和DXAD,3个材料根茎生物量一直表现为LZYZ>DXWY>DXAD。

根茎生物量绝对增长率在生长季的中前期和末期为正值,而生长季的后期为负值(图3-B)。根茎生物量AGR有两个较大值,分别为拔节期至抽穗期和成熟期至枯黄期,3个材料分别为26.33、13.48、4.42 g/(株·d)、45.39、35.11、16.26 g/(株·d);负值为开花期至成熟期,3个材料分别为-3.75、-10.07、-1.84 g/(株·d)。

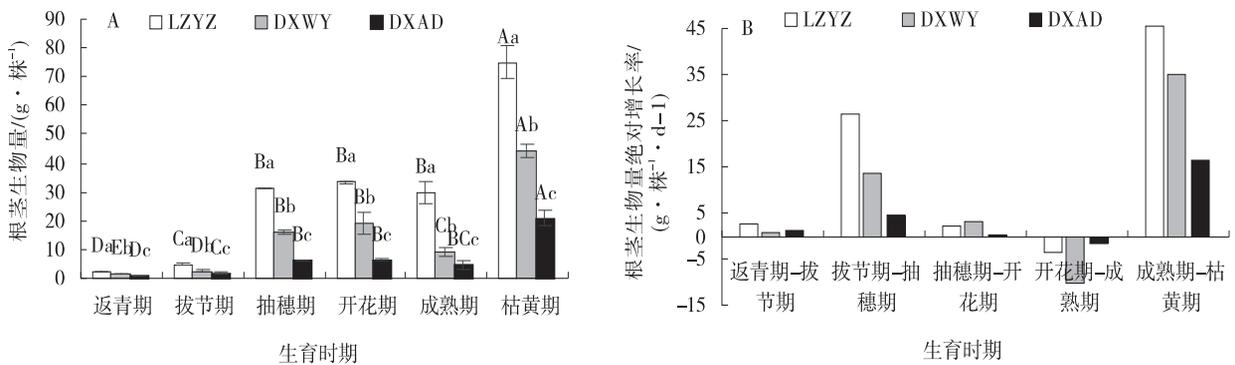


图3 不同生育时期根茎生物量及绝对增长率

Fig. 3 Dynamic changes of rhizome biomass and absolute growth rate

2.2 含氮化合物动态变化

2.2.1 硝态氮含量变化 随生育时期推进,3个草地早熟禾材料NO₃⁻-N含量整体上变化规律一致,均呈单峰曲线变化(图4)。返青期3个材料NO₃⁻-N含量均处于较低水平,LZYZ、DXWY和DXAD分别为

350.20、250.34、240.58 μg/g,LZYZ比DXWY高39.89%,比DXAD高45.56%。拔节期迅速上升,达到整个生育时期最大值,DXWY增长最快,相较于返青期增加63.11%;DXAD增加48.40%;LZYZ增加幅度最小,仅为30.46%;此时期3者NO₃⁻-N含量差

异不显著($P>0.05$)。拔节期后3个材料均持续下降,在枯黄期为整个生育时期最小值,分别为307.53、217.31、186.24 $\mu\text{g/g}$,三者差异显著($P<0.05$)。

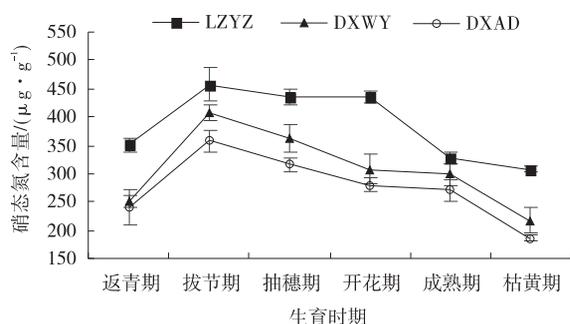


图4 不同生育时期草地早熟禾的硝态氮含量

Fig. 4 Changes of nitrate nitrogen content in *Poa pratensis*

2.2 游离氨基酸含量变化

游离氨基酸含量随生育时期推进均呈“升-降-升”的变化规律(图5)。返青期3个材料均处于整个生育时期最小值,LZYZ、DXWY和DXAD含量分别为18.65、19.65、17.52 $\mu\text{g/g}$,三者差异不显著($P>0.05$);返青期后持续上升至抽穗期出现整个生育时期最大值,三者游离氨基酸含量分别增加371.37%、303.77%和240.15%,此时LZYZ比DXWY高10.77%,比DXAD高13.99%,LZYZ显著大于DXWY和DXAD($P<0.05$);抽穗期后迅速下降直至成熟期下降趋势停止。在枯黄期三者含量均有所上升,但增加幅度不同,相比于成熟期,LZYZ增加65.50%,DXWY增加28.36%,DXAD增加56.39%,此时游离氨基酸含量表现为LZYZ>DXWY>DXAD,三者差异显著($P<0.05$)。

2.3 氮代谢相关酶活性变化

2.3.1 硝酸还原酶活性动态变化 NR活性与 NO_3^-

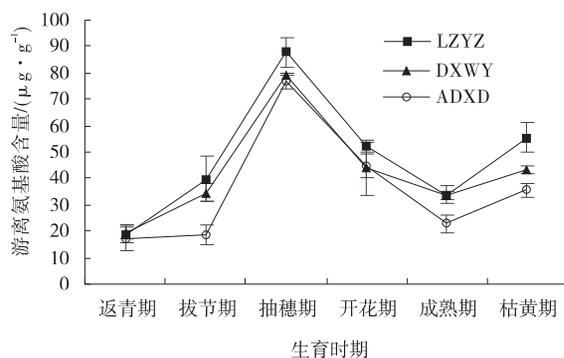


图5 不同生育时期草地早熟禾游离氨基酸含量

Fig. 5 Changes of free amino acid content in *Poa pratensis*

N含量变化趋势相似,均呈单峰曲线,只是峰值略微滞后于 NO_3^- -N,出现在抽穗期(图6)。返青期3个材料NR活性均为整个生育时期最小值,LZYZ、DXWY和DXAD分别为10.28、8.90、5.69 $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$,三者差异显著($P<0.05$);返青期后均持续上升至抽穗期达到峰值,3个材料分别增加了65.56%、77.07%和161.13%,LZYZ比DXWY高8.07%,比DXAD高14.69%,3个材料差异不显著($P>0.05$);峰值过后整体呈下降趋势,直至枯黄期。

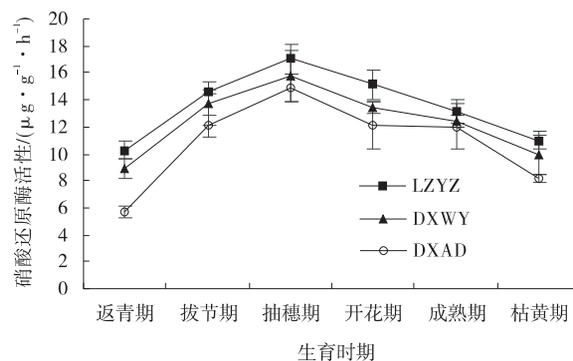


图6 不同生育时期草地早熟禾硝酸还原酶活性

Fig. 6 Changes of nitrate reductase activity in *Poa pratensis*

2.3.2 GS活性变化 随生育时期推进,草地早熟禾GS活性变化呈双峰曲线,峰值出现抽穗期和成熟期(图7)。返青期3个材料GS活性均处于整个生育时期最低值,LZYZ、DXWY和DXAD分别为10.85、7.10、4.51 $\text{A}/(\text{g}\cdot\text{h})$,持续上升至抽穗期达到第一个峰值,此时3个材料酶活性分别为30.92、25.87、20.82 $\text{A}/(\text{g}\cdot\text{h})$,LZYZ比DXWY高24.32%,比DXAD高48.47%。开花期均有不同程度下降,在成熟期达到第二个峰值,LZYZ上升幅度最大,相比于开花期增加19.72%;DXAD增加12.39%,DXWY增加最少,仅为2.61%;LZYZ显著大于DXWY和DXAD($P<0.05$)。枯黄期均迅速下降,DXWY与DXAD之间差异不显著($P>0.05$)。

2.3.3 GOGAT活性 GOGAT活性与GS活性变化趋势相似,均呈“升-降-升-降”的“M”型曲线变化,峰值出现在抽穗期和成熟期(图8)。返青期LZYZ、DXWY和DXAD酶活性分别为2.27、1.73、1.70 $\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{min})$,三者差异不显著($P>0.05$);返青期至拔节期酶活性缓慢增长,两个时期间差异不显著($P>0.05$);拔节期后迅速上升至抽穗期达到第1个峰值,也是整个生育时期最大值,此时3个材料分别为

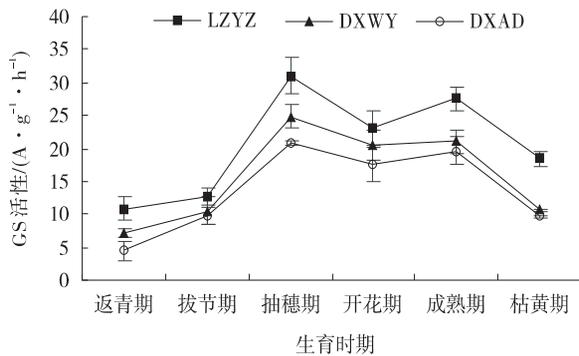


图7 不同生育时期草地早熟禾GS活性

Fig. 7 Changes of GS activity of *Poa pratensis*

10.04、7.37、5.02 $\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{min})$, LZYZ 比 DXWY 高 36.17%, 比 DXAD 高 100.17%, 三者差异显著 ($P < 0.05$); 在开花期迅速下降至较低水平; 于成熟期出现第 2 个峰值, 此时 3 个材料酶活性分别为 7.78、5.20、4.30 $\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{min})$, 较开花期分别增加 136.00%、70.49% 和 80.04%, 均显著小于第 1 个峰值 ($P < 0.05$), 且三个材料间差异显著 ($P < 0.05$), 在枯黄期酶活性均下降且材料间差异不显著 ($P > 0.05$)。

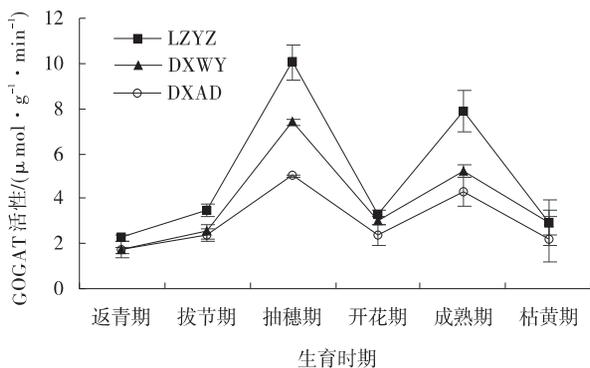


图8 不同生育时期草地早熟禾GOGAT活性

Fig. 8 Changes of GOGAT activity of *Poa pratensis*

2.3.4 GDH 活性变化 整个生育时期中, 供试 3 个材料 GDH 活性变化趋势一致, 只是材料间活性高低略有差异 (图 9)。3 个材料在返青期酶活性较低, LZYZ、DXWY 和 DXAD 分别为 0.50、0.23、0.26 $\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{min})$, 返青期至抽穗期 3 个材料酶活性基本维持在这一水平, 且前期材料间表现为 LZYZ 大于 DXWY 和 DXAD。抽穗期至成熟期酶活性迅速上升, 3 个材料分别提高 558.61%、1 527.78%、1413.04%, LZYZ 和 DXWY 均显著高于 DXAD ($P < 0.05$); 成熟期至枯黄期 GDH 活性略有下降, 但两个生育时期间

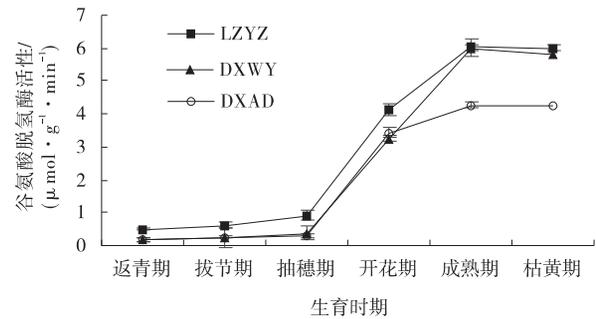


图9 不同生育时期草地早熟禾GDH活性

Fig. 9 Changes of GDH activity of *Poa pratensis*

差异不显著 ($P > 0.05$)。

2.4 草地早熟禾根茎扩展各指标增长速率与含氮化合物的相关性

整体上草地早熟禾根茎扩展能力与硝态氮和游离氨基酸含量、NR、GS 和 GOGAT 活性正相关, 与 GDH 活性负相关 (表 2)。其中分蘖数增长率与硝态氮显著正相关, 相关系数为 0.496。根茎数增长率与硝态氮、游离氨基酸、NR 和 GOGAT 极显著正相关 ($P < 0.01$), 相关系数分别为 0.677、0.663、0.658 和 0.714; 与 GS 活性显著正相关 ($P < 0.05$), 相关系数为 0.485。地上生物量增长率与硝态氮、NR 和 GOGAT 极显著正相关 ($P < 0.01$), 相关系数为 0.648、0.703 和 0.602; 与游离氨基酸和 GS 显著正相关 ($P < 0.05$), 相关系数分别为 0.528 和 0.537。GDH 活性与分蘖数和地上生物量增长率呈极显著和显著负相关, 相关系数分别为 0.711 和 0.582。根茎生物量增长率与以上指标相关性均不显著 ($P > 0.05$)。

表2 根茎扩展指标增长率与含氮化合物的相关系数

Table 2 Correlation coefficient between growth rate of rhizome index and nitrogen compound

含氮化合物	根茎扩展各指标增长率			
	分蘖数	根茎数	地上生物量	根茎生物量
硝态氮	0.496*	0.677**	0.648**	-0.120
游离氨基酸	0.049	0.663**	0.528*	0.463
NR	0.118	0.658**	0.703**	0.031
GS	0.146	0.485*	0.537*	0.073
GOGAT	0.074	0.714**	0.602**	0.101
GDH	-0.711**	-0.427	-0.582*	0.263

注: 表中**在 0.01 水平 (双侧) 上极显著相关; *在 0.05 水平 (双侧) 上显著相关

3 讨论

无性系的生长伴随着构件数量的增加及所占空

间的增大。本研究中草地早熟禾分蘖数和根茎数在整个生育时期均呈渐增趋势,但返青期至抽穗期增长最快,抽穗期后增长速率减缓,这与孙建华等^[25]发现大部分草地早熟禾在4、5月出现分蘖高峰期,极少数能延续至6月中旬的结果一致;也与其地上部及根部最适生长温度为15~20℃和10~18.3℃的特点相吻合^[26],表明草地早熟禾无性系的扩张活动在开花期前已基本完成。开花期是植物由营养生长转为生殖生长的标志,开花后花、穗和种子等生殖器官成为植物的生长及营养物质的输入中心,营养生长基本停止^[27]。生物量随生育时期的动态变化具有明显趋势,许志信等^[28]发现早熟禾地上生物量随其生育时期推进呈增加趋势,峰值出现在9月初;郑伟等^[29]表明,在牧草整个生长季,地上生物量变化呈单峰型,峰值出现在8月上旬。大量研究表明,地下生物量随生育时期或季节推进主要变化趋势有两种:单峰型和双峰型曲线变化^[30]。本试验中,草地早熟禾地上生物量呈单峰曲线变化,峰值出现在成熟期,根茎生物量呈“N”字型变化,与高寒草甸地下生物量变化趋势相同^[30]。

NO_3^- -N是植物体内重要的营养元素,根系是吸收硝态氮的主要器官。郭彦青^[31]对杨树的研究发现,全年中,杨树根部 NO_3^- -N含量呈单峰曲线变化,在4月13日达到峰值后持续下降。本研究中, NO_3^- -N含量变化与上述研究一致,呈单峰曲线,峰值出现在拔节期,拔节期后由于生长中心的转移及后期根系活力下降等原因,含量持续下降至与返青期相近水平。游离氨基酸既是氮的同化产物又是蛋白质分解的产物,是源库间实现氮素分配、转移、再分配的主要形式,可以反映植物体内参与转移的氮素基本情况^[32]。王宇通^[33]研究发现,在全叶马兰一个生长周期中,根部游离氨基酸呈钟型变化,早期和末期含量较少,中期含量高。本试验中,草地早熟禾前期变化与全叶马兰相似,但在枯黄期表现为上升趋势,这一现象与多年生禾本科植物奇岗^[34]的趋势一致。由于植物在生长的不同时期追求对氮素利用最大化,而叶片中的氮素含量往往最高,当秋冬叶片衰老、枯萎凋落时,叶绿体解体,叶绿素分解释放出大量氮素,实现氮素向其他器官的转移,从而防止由叶片脱落导致的氮素流失,称为养分回流,转移的器官因植物而异。品种间

氮代谢酶活性的差异是品种对于氮素吸收、利用差异的基础^[19],本研究中,LZYZ的NR、GS、GOGAT和GDH酶活性在整个生育时期均高于DXAD,表明与其余两个材料相比,LZYZ有着更强的氮素同化能力。

氮素对植物生长尤为重要,尤其是对分蘖的发生起决定性作用,人们通常通过增施氮肥来提高作物分蘖能力^[35]。田广丽等^[35]发现,水稻的相对分蘖速率与氮浓度呈极显著正相关。刘杨等^[36]发现,低浓度氮水平下,分蘖芽处于休眠状态;而较高浓度的氮可以解除分蘖芽休眠,促进其生长。相关研究表明,氮素含量增加一方面使水稻分蘖中玉米素与生长素含量增加,脱落酸含量降低,从而促使分蘖萌发;另一方面,植物体内较高的氮素含量显著提高了叶中的光合速率,促进植物体内非结构性碳水化合物的积累,为分蘖生长提供足够同化物,因此植物体内氮素通过调节激素和干物质生产两方面来调控分蘖的发生^[37]。Eg-gens等^[38]研究发现,高比率硝态氮可以促进早熟禾分蘖及增加地上部分干重;张鹤山等^[39]研究表明,氮肥施量与草坪草地上生物量、草坪密度和草坪高度显著正相关。本试验中相关性分析显示,分蘖数、根茎数及地上生物量增长率均与硝态氮和游离氨基酸极显著或显著正相关,与上述结论一致。

4 结论

返青期至抽穗期是草地早熟禾根茎扩展的主要阶段;拔节期至抽穗期是地上生物量快速积累阶段;根茎生物量有两个快速积累阶段,分别为拔节期至抽穗期和成熟期至枯黄期。草地早熟禾生长发育过程中有两个氮代谢活跃的时期,分别为抽穗期和成熟期,相比于DXWY和DXAD,LZYZ有着更强的氮素同化能力。草地早熟禾根茎扩展能力受含氮化合物及相关酶活性的影响,根茎中 NO_3^- -N和游离氨基酸含量越多,NR、GS和GOGAT活性越高,GDH活性越低,越有利于其根茎扩展。

参考文献:

- [1] 白小明,张咏梅,陈辉,等. 甘肃野生草地早熟禾(*Poa pratensis*)分布区土壤养分状况[J]. 中国沙漠,2020,40(6):242-249.
- [2] 张浩玮,白小明,樊敬辉,等. 野生草地早熟禾根茎扩展对水分调控的响应[J]. 草业科学,2018,35(10):2471-

- 2480.
- [3] 石红霄,周青平,颜红波,等. 3种根茎型禾草无性繁殖时空扩展初探[J]. 草业科学,2008,25(5):127-132.
- [4] 张富鑫,颜建明,杨海兴,等. 缓释肥配施有机物对结球甘蓝生长生理、产量及品质的影响[J]. 甘肃农业大学学报,2021,56(6):73-81.
- [5] 陈玲玲,任伟,毛培胜,等. 氮素对紫花苜蓿种子产量与氮累积动态变化的影响[J]. 草业学报,2017,26(6):98-104.
- [6] 何雪菲,黄战,马泽跃,等. 库尔勒香梨树在不同生育期的氮肥利用率[J]. 经济林研究,2020(4):134-142.
- [7] 吴雅薇,赵波,杜伦静,等. 低氮胁迫对不同氮效率玉米品种苗期叶片碳氮代谢的影响[J]. 玉米科学,2019,27(6):74-83.
- [8] 宁书菊,陈晓飞,张国英,等. 水稻生育后期剑叶氮代谢相关酶活性及动力学变化[J]. 中国生态农业学报,2012,20(12):1606-1613.
- [9] Forde B. G. Local and long-range signaling pathways regulating plant responses to nitrate [J]. *Annu Rev Plant Biol*,2002,53:203-24.
- [10] 王晓宇,冯伟,郭天财,等. 两种穗型小麦品种分蘖衰亡进程中茎蘖碳氮代谢的差异[J]. 西北农业学报,2010,19(11):38-42+57.
- [11] 杨文钰,韩惠芳,任万君,等. 烯效唑干拌种对小麦分蘖期间内源激素及糖氮比的影响[J]. 作物学报,2005,31(6):760-765.
- [12] 李静静,陈雅君,张璐,等. 水氮交互作用对草地早熟禾生理生化与坪用质量的影响[J]. 中国草地学报,2016,38(4):42-48.
- [13] 张浩玮,白小明,樊敬辉,等. 不同水分处理对草地早熟禾生物量及N、P积累与分配的影响[J]. 草原与草坪,2018,38(5):8-15.
- [14] 刘晓静,张德罡,胡杨,等. 水肥耦合对延长冷地型草坪绿期的效应研究[J]. 草原与草坪,2011,31(4):18-24.
- [15] 杨志坚,冯金玲,吴小慧,等. 氮磷钾施肥对闽楠幼苗营养元素吸收与利用的影响[J]. 生态学杂志:2021,40(4):998-1011.
- [16] 李灿东,郭泰,王志新,等. 叶面施氮对不同类型大豆品种氮素积累与分配的影响[J]. 核农学报,2021,35(3):674-680.
- [17] 代立,李太兴,王克勤,等. 自然降雨下玉米秸秆堆沤还田对滇中小流域坡耕地氮素流失的影响[J]. 水土保持学报,2021,35(1):1-8.
- [18] 王淑颖,李小红,程娜,等. 地膜覆盖与施肥对秸秆碳氮在土壤中固存的影响[J]. 中国农业科学,2021,54(2):345-356.
- [19] 宁书菊,窦慧娟,陈晓飞,等. 水稻生育后期根系氮代谢生理活性变化的研究[J]. 中国生态农业学报,2009,17(3):506-511.
- [20] 王月福,于振文,李尚霞,等. 小麦开花后不同器官中硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶的活性比较[J]. 植物生理学通讯,2003,39(3):209-210.
- [21] 梁勇,李大清,陈月星,等. 小麦花后库源器官氮素、磷素营养物质积累动态分析[J]. 河南农业大学学报,2019,53(4):512-518.
- [22] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [23] 王小纯,熊淑萍,马新明,等. 不同形态氮素对专用型小麦花后氮代谢关键酶活性及籽粒蛋白质含量的影响[J]. 生态学报,2005,25(4):802-807.
- [24] 马维伟,王辉,李广,等. 甘南尕斯海湿地退化过程中植被生物量变化及其季节动态[J]. 生态学报,2017,37(15):5091-5101.
- [25] 孙建华,王彦荣,李世雄. 草地早熟禾不同品种生长与分蘖特性的研究[J]. 草业学报,2003,12(4):20-25.
- [26] 孙吉雄. 草坪学[M]. 中国农业出版社,1995.
- [27] Pua E. C, Davey M. R. Plant developmental biology — biotechnological perspectives volume 1 [J]. *Proc. am. power Conf*,2010,34(3):182-187.
- [28] 许志信,曲永全,白飞. 草甸草原12种牧草生长发育规律和草群地上生物量变化动态研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版),2001,22(2):28-32.
- [29] 郑伟,董全民,李红涛,等. 环湖地区高寒草原植物群落的生长规律[J]. 青海畜牧兽医杂志,2011,41(6):13-15.
- [30] 宇万太,于永强. 植物地下生物量研究进展[J]. 应用生态学报,2001,12(6):927-932.
- [31] 郭彦青. 杨树营养贮藏蛋白质动态变化规律的研究[D]. 南京:南京林业大学,2005.
- [32] 徐寿军,张凤英,刘志萍,等. 春大麦营养器官游离氨基酸含量变化特征及其与籽粒蛋白质含量相关分析[J]. 核农学报,2018,32(1):131-140.
- [33] 王宇通. 多年生牧草衰老特征及氮代谢变化规律的研究[D]. 北京:中国农业大学,2014.
- [34] Strullu L, Beaudoin N, Cortazar Atauri, *et al.* Simulation of biomass and nitrogen dynamics in perennial organs and

- shoots of miscanthus×Giganteus Using the STICS Model [J]. *BioEnergy Research*, 2014, 7 (4) : 1253–1269.
- [35] 田广丽,周毅,孙博,等. 氮素及栽培密度影响水稻分蘖动态的机制[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(4) : 896–904.
- [36] 刘杨,王强盛,丁艳锋,等. 氮素和 6-BA 对水稻分蘖芽发育的影响及其生理机制[J]. *作物学报*, 2009, 35(10) : 1893–1899.
- [37] Jiang P Y. Studies on the sensitive stage to environment during differentiation and development of tiller buds in rice plant[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1996, 20(3) :
- [38] Eggens, Wright C, Carey K. Nitrate and ammonium nitrogen effects on growth of creeping bentgrass and annual bluegrass[J]. *HortScience: a Publication of the American Society for Horticultural Science*, 1989, 24 (6) : 952–954.
- [39] 张鹤山,刘晓静,张德罡,等. 氮肥对冷季型混播草坪返青期生长特性的影响[J]. *草原与草坪*, 2006, 26(2) : 19–23.

Study on the changes of nitrogen metabolism and its correlation with rhizome expansion of *Poa pratensis*

YUAN Ya-juan, BAI Xiao-ming, ZHU Ya-nan, ZHANG Yu-jing, YAN Yu-bang,
ZHANG Cai-zhong, LI Yu-jie

(College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University/Key Laboratory of Grassland Ecosystem/Ministry of Education/Pratacultural Engineering Laboratory of Gansu Province/Sino-U. S. Center for Grassland Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to determine the dynamic changes of nitrogen compounds in *Poa pratensis* with different growth stages and its relationship with rhizome expansion, three wild *Poa pratensis* with significant differences in rhizome expansion ability were used as materials to measure the indexes of rhizome expansion and nitrogen metabolism at different growth stages. The results showed that the rhizoid expansion of *Poa pratensis* mainly occurred from re-greening stage to heading stage, during which the tiller numbers of LZYZ, DXWY and DXAD increased by 176.08%, 127.13% and 65.90%, respectively and the number of rhizomes increased by 662.14%, 544.94% and 429.41%, respectively. The results also implied that the aboveground biomass accumulated rapidly from jointing stage to heading stage, and the absolute aboveground biomass growth rates of the three materials were 136.22, 78.71 and 68.33 g/(plant • d), respectively. There were two rapid accumulation periods of rhizome biomass. One was from jointing stage to heading stage, in which the absolute growth rates of rhizome biomass of the three materials were 26.33, 13.48 and 4.42 g/(plant • d). The other was from mature stage to withering stage, in which the absolute growth rates of the three materials at this stage were 45.39, 35.11 and 16.26 g/(plant • d) respectively. The results further indicated that nitrate nitrogen (NO_3^- -N) content and nitrate reductase (NR) activity showed a single peak curve with the growth stage, and the peaks appeared at jointing stage and heading stage, respectively. The content of free amino acids showed a "rise-decline-rise" pattern, with the peak appearing in heading stage and increasing in withering stage. The activities of glutamine synthase (GS) and glutamate synthase (GOGAT) showed a double-peak curve, and the peaks were at heading stage and maturity stage, respectively. The activity of glutamate dehydro-

genase (GDH) was low in early growth stage, increased rapidly from flowering stage to maturity stage, reached the maximum in the mature stage, and remained high in withering stage. Correlation analysis showed that the growth rates of each index of *Poa pratensis* rhizome expansion were significantly or positively correlated with NO_3^- -N, free amino acids, NR, GS and GOGAT, and negatively correlated with GDH activity. Therefore, the higher the nitrate nitrogen and free amino acid contents in the rhizome of *Poa pratensis*, the higher the activities of NR, GS and GOGAT, the lower the activities of GDH, and the more conducive to the rhizome expansion. The results of this study provide a theoretical basis for the regulation mechanism of rhizome expansion and rational fertilization of *Poa pratensis*.

Key words: *Poa pratensis*; rhizome expansion; nitrogen metabolism; dynamic change; correlation

(上接 34 页)

Diversity and community structure analysis of arbuscular mycorrhizal fungi in *Zoysia japonica* ‘Lanyin No.3’ football fields

ZHANG Chu-ting, PENG Xue, SONG Yu, XIN Guo-rong

(State Key Laboratory of Biocontrol, Guangdong Provincial Key Laboratory of Plant Resources, School of Agriculture, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) can form mutualistic symbiosis with plant roots, which is beneficial to plant growth and development. In order to screen the AMF suitable for *Zoysia* turf, amplicon technique was used in the molecular identification of the AMF community structure and species of four football field turf plants with *Zoysia japonica* ‘Lanyin No. 3’. The result showed that *Z. japonica* ‘Lanyin No. 3’ in all football fields formed symbiotic structures with AMF, and the main form of infection was hyphal infection. The AMF communities in all the lawns were dominated by *Glomus*, followed by *Scutellospora* and *Acaulospora*. In conclusion, the AMF inoculants with the *Glomus* fungus as the main component could provide guarantee for the construction and development of mycorrhizal technologies such as water and fertilizer conservation of *Z. japonica* ‘Lanyin No. 3’ football lawn.

Key words: *Zoysia japonica* ‘Lanyin No. 3’; AMF inoculant; amplicon sequencing; community structure; football lawn