

施钾对苇状羊茅生长、生理特性及钾吸收的影响

朱晓玲, 赵新燕, 米明, 朱春晓, 陈梦瑶, 李文靖, 吴传月, 吴欣宇, 司东霞*

(聊城大学农学与农业工程学院, 山东 聊城 252059)

摘要:【目的】明确钾肥施用对苇状羊茅(*Festuca arundinacea*)生长、生理特性的影响, 确定苇状羊茅适宜的钾肥用量和钾营养诊断指标。【方法】通过盆栽试验, 研究苇状羊茅地上部生长、生理和钾素养分吸收对不同钾肥用量(K_2O 分别为 0、18、36、54 g/m²)的响应。【结果】随钾肥用量的增加, 苇状羊茅各生育阶段的株高和地上部干物质质量均呈先升后降的变化趋势, 钾肥用量 36 g/m² 时达最大值; 出苗后 50~137 d 和 0~50 d 植株株高增量和干物质累积速率较大。施用钾肥 36 g/m² 有利于促进植株地上部钾的吸收, 提高植株叶片的光合色素含量、抗氧化酶(POD)活性和可溶性蛋白含量, 降低丙二醛(MDA)含量。增加钾肥用量提高了苇状羊茅栽培体系的钾素损失风险。适宜苇状羊茅生长的钾肥用量范围为 K_2O 7.0~49.9 g/m², 获得 80% 最大地上部干物质质量的地上部钾临界浓度为 10.8 g/kg。【结论】钾肥施用对苇状羊茅生长和生理特性影响显著, 钾肥用量 7.0 g/m² 和地上部钾浓度 10.8 g/kg 可分别作为苇状羊茅管理的钾肥用量推荐和植株钾营养诊断参考。

关键词: 钾肥; 苇状羊茅; 生长生理特性; 钾吸收; 钾肥适宜用量; 钾营养诊断

中图分类号: S543; Q945.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-5500(2024)01-0069-09

DOI: 10.13817/j.cnki.cycp.2024.01.008



钾是植物生长必需的大量营养元素之一, 在酶的激活、蛋白质合成、物质运输和渗透调节等方面具有重要作用^[1]。植物生长环境中充足的钾素供应可促进植物生长和养分吸收^[2-3], 提高植物对逆境的抵抗能力^[4-5], 钾素供应不足或过量均会影响植物体内的各种生理或代谢活动, 从而限制植物的生长^[6]。土壤是植物吸收钾的主要来源, 随着作物单产和复种指数的提高, 土壤供钾水平显著降低, 农业系统中的钾平衡总体表现为亏缺^[7-9], 外源钾肥施用成为平衡土壤钾素亏缺, 提高土壤生产力的主要措施^[10]。中国是一个无机钾肥资源匮乏的国家, 在过去十年中, 每年近 50% 的农业钾肥依赖进口^[11], 钾肥供需矛盾十分突

出, 已经成为制约中国乃至世界农业生产发展的重要限制因子之一^[12-13]。合理施用钾肥, 减少钾素损失, 提高钾肥的利用效率成为优化钾资源配置, 实现绿色可持续生产的重要途径。

目前, 基于土壤速效钾和植物钾含量测试建立的养分丰缺指标法和植物钾营养诊断技术主要应用于粮食作物和经济作物^[14-15]。草坪草作为重要的城市园林绿化植物, 其栽培介质肥力水平低下和肥料用量不足的情况普遍存在, 钾素缺乏的现象时有发生, 致使草坪草矮小枯黄, 降低了草坪的观赏效果, 草坪养护管理过程中钾肥的施用受到广泛关注^[13]。有研究表明, 施用钾肥可促进草坪草生长, 增强其逆境适应性^[16-18], 对提高草坪质量, 延长草坪持绿期, 改善生态环境具有重要作用^[19], 然而, 在适宜草坪生长的钾肥施用定量化和植株钾营养诊断研究方面仍然不足。

苇状羊茅(*Festuca arundinacea*)是禾本科(Poaceae)早熟禾亚科(Pooideae)羊茅属(*Festuca*)的多年生冷季型草本植物, 具有根系发达, 成坪快, 抗逆性强的特点, 在草坪绿化、牧草生产和生态修复等方面应

收稿日期: 2023-09-15; 修回日期: 2023-11-06

基金项目: 聊城大学风景园林学科建设基金(319462212);
聊城大学大学生创新创业训练计划项目
(CXC2022411)

作者简介: 朱晓玲(1982-), 女, 山东蒙阴人, 硕士研究生。
E-mail: 93987214@qq.com

*通信作者。E-mail: sidongxia@126.com

用广泛^[20-21]。本研究以苇状羊茅为供试植物,研究春播条件下,不同钾肥用量对其生长、生理和养分吸收的影响,并根据养分丰缺指标法确定苇状羊茅正常生长适宜的钾肥用量和植株地上部临界钾浓度,为苇状羊茅养护管理中合理施用钾肥和进行植株钾营养诊断提供依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验于2022年4—11月在聊城大学生态园(36.45°N,115.97°E)进行。供试植物为冷季型草坪草苇状羊茅(*Festuca arundinacea*),供试种子由江苏乐尔达种业有限公司提供。试验用钾肥和氮、磷肥分别为硫酸钾(K₂O 53.5%)和尿素(N 46%)、过磷酸钙(P₂O₅ 12%)。供试土壤母质为黄河冲积物,土壤质地为砂质壤土,土壤有机质 6.97 g/kg,土壤全氮 0.37 g/kg,土壤碱解氮 39 mg/kg,土壤无机氮(NH₄⁺-N+NO₃⁻-N) 4.2 mg/kg,土壤速效磷 9 mg/kg,土壤速效钾 44 mg/kg,pH 值 7.68。

1.2 试验设计

试验为单因素盆栽培养试验,随机区组设计。试验因素为钾肥用量,共设4个处理,K₂O分别为0、18、36、54 g/m²(分别用K₀、K₁₈、K₃₆和K₅₄表示),每处理重复9次,各处理氮、磷用量相同,分别为N 36 g/m²和P₂O₅ 16 g/m²。试验所用盆钵为6加仑聚氯乙烯盆,盆钵上直径32 cm,下直径26 cm,高35 cm,每盆装土20 kg,装盆时所有钾、氮、磷肥与盆土表面0~10 cm土层的土壤混合。2022年4月10日,选择形态大小一致且无病虫害的种子播种,播种深度1 cm,播种量38 g/m²,播种后浇透水。4月20日出苗,出苗后每3~4 d浇水1次,每次每盆浇水1 500 mL。苇状羊茅培养期间,人工去除杂草。

1.3 测定项目与方法

分别于6月9日、9月4日、11月9日(出苗后50 d、137 d、200 d)将植株地上部自根茎结合处剪开,每处理随机取代表性植株20株,将植株平展伸直,用钢卷尺测株高。植株地上部样品在75℃下烘干至恒重,测定地上部生物量。利用后一阶段与前一阶段的株高差计算出苗后0~50、50~137和137~200 d各阶段的株高增量;利用后一阶段与前一阶段的干物质质量差值

除以各阶段的天数,计算出苗后0~50、50~137和137~200 d各阶段的干物质累积速率。

9月4日(出苗后137 d),每处理选取代表性植株20株,采集其新鲜叶片,采用95%乙醇浸提一分光光度法测定叶绿素含量;采用考马斯亮蓝G-250法测定可溶性蛋白含量,愈创木酚法测定过氧化物酶(POD),紫外吸收法测定过氧化氢酶(CAT),硫代巴比妥酸法测定丙二醛(MDA)含量^[22]。

将出苗后200 d植株地上部烘干样品磨细过筛,采用H₂SO₄-H₂O₂消煮植物样品,火焰光度法测定全钾含量。根据地上部生物量和钾含量计算地上部吸钾量。利用单位面积钾素投入量和地上部吸钾量计算钾素表观平衡。

地上部吸钾量(g/m²)=地上部生物量(g/m²)×地上部钾含量(%)

钾素(K₂O)表观平衡(g/m²)=钾素投入总量(g/m²)-植株带出钾素总量(g/m²)

分析钾肥用量和地上部生物量的相关性,根据其数学函数方程,计算春播苇状羊茅地上部最大生物量和获得最大生物量的钾肥用量。依据植物营养的养分丰缺指标法,以地上部相对生长量80%、50%为临界值判断钾肥供应的丰缺程度,地上部相对生物量>80%时,钾肥用量为适宜,80%~50%为缺乏或毒害,<50%为严重缺乏或严重毒害。

地上部相对生长量(%)=地上部生物量/地上部最大生物量×100%

1.4 数据分析

试验采用Excel 2010进行数据整理和制图,利用SPSS 26.0进行单因素方差分析和多重比较(One-way ANOVA)。

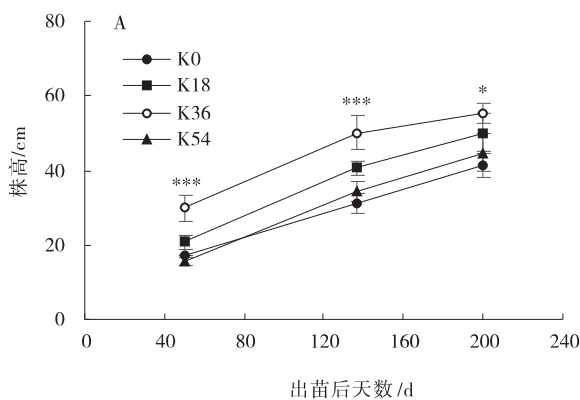
2 结果与分析

2.1 不同钾肥用量对苇状羊茅地上部生长状况的影响

2.1.1 株高 苇状羊茅株高随生育期的推进呈增加趋势,各生长阶段的株高不同钾肥处理间差异显著($P<0.05$)(图1-A)。各生长阶段K₃₆处理植株显著高于其余钾肥处理,在出苗后200 d与K₁₈差异未达显著水平,不施钾肥或过量施用钾肥株高较低。不同生长阶段的株高增量差异显著($P<0.001$),出苗后0~50 d

和50~137 d株高增量高于137~200 d,前两个阶段差异不显著(图1-B);不同钾肥用量间株高增量 K_{36} 显著高于 K_0 ,但组间差异未达显著水平($P=0.075$),生长阶段和钾肥用量存在显著的交互作用。钾肥用量对株高增量的影响主要表现在0~50 d和50~137 d,出苗后137~200 d的株高增量各钾肥用量间差异不显著。表明不同钾肥处理的苇状羊茅株高差异主要表现在生长中前期,适宜钾肥用量可增加株高,促进植株生长。

2.1.2 地上部干物质累积状况 苇状羊茅植株干物



质量随生育期增加,各生长阶段干物质质量不同钾肥处理间差异显著($P<0.001$)(图2-A)。各各生长阶段 K_{36} 处理的干物质质量高于其余钾肥处理,生长中前期(出苗后50 d和137 d)于 K_{18} 差异未达显著水平。不同生长阶段的干物质累积速率差异显著($P<0.001$),出苗后50~137 d高于0~50 d,137~200 d干物质累积速率最低(图1-B)。钾肥用量显著影响干物质累积速率($P<0.001$),不同钾肥用量间干物质累积速率 K_{36} 最大,显著高于其余钾肥处理; K_{54} 最小,且与 K_0 差异不显著。

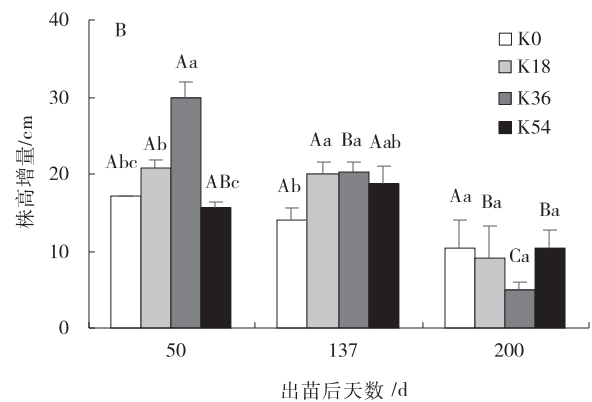


图1 不同钾肥用量苇状羊茅株高变化

Fig. 1 Changes of plant height in *F. arundinacea* with different K fertilizer rates

注:*, **, ***表示相同生长阶段不同钾肥用量组间差异分别达显著($0.01 \leq P < 0.05$)、非常显著($0.001 \leq P < 0.01$)和极显著($P < 0.001$)水平;不同大写字母表示相同钾肥用量不同生长阶段间差异显著($P < 0.05$),不同小写字母表示相同生长阶段不同钾肥用量处理间差异显著($P < 0.05$);图2同。图1-B株高增量分别表示出苗后0~50、50~137和137~200 d的株高差。

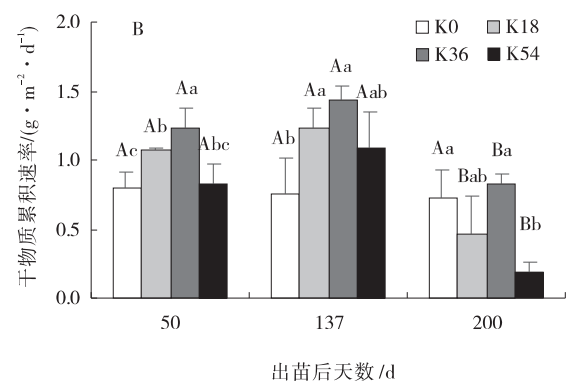
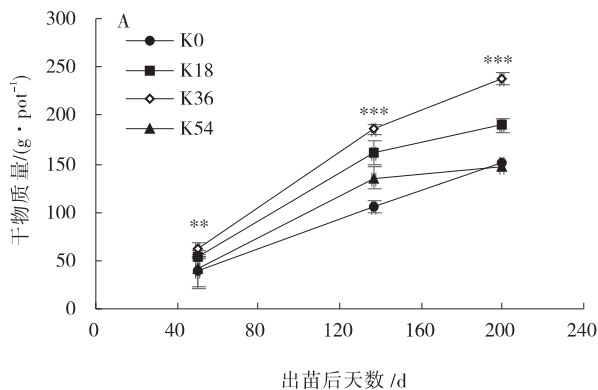


图2 不同钾肥用量苇状羊茅地上部干物质累积特性

Fig. 2 Characteristics of shoot dry matter accumulation in *F. arundinacea* with different K fertilizer rates

钾肥用量与生长期存在明显的交互作用($P < 0.05$)。出苗后0~50 d,干物质累积速率 K_{36} 高于其余钾肥处理, K_0 最低;出苗后50~137 d, K_{36} 处理高于 K_0 ,与其余两钾肥处理 K_{18} 和 K_{54} 差异不显著;出苗后137~200 d, K_{36} 与 K_0 高于 K_{54} ,与 K_{18} 无显著性差异。表明不同钾肥用量对植株干物质累积的影响贯穿于整个生

长阶段,适量施用钾肥可提高干物质累积速率,过量钾肥投入,干物质累积速率降低。

2.2 不同钾肥用量对苇状羊茅叶绿素及其组分含量的影响

钾肥施用显著影响苇状羊茅叶片的光合色素含量(表1)。随着钾肥施用量的增加,叶绿素a、叶绿素

b、总叶绿素 a+b 和类胡萝卜素含量均呈现先增加后下降的趋势,均在 K₃₆ 处理达到最大值。不同钾肥用量,植株叶片叶绿素 a 和叶绿素 a+b 含量组间差异显著($P<0.05$),K₃₆ 显著高于 K₀ 和 K₅₄ ($P<0.05$),与 K₁₈ 无显著性差异;叶绿素 b ($P=0.127$)、类胡萝卜素 ($P=0.084$) 含量组间差异未达显著水平。叶绿素 a/b 各钾肥处理之间差异不显著。表明适量钾肥有利于提高苇状羊茅叶片的光合色素(尤其叶绿素 a、叶绿素 a+b) 含量,不施钾肥或过量施用钾肥光合色素含量较低。

表 1 不同钾肥用量苇状羊茅光合色素含量
Table 1 The photosynthetic pigment content of *F. arundinacea* with different K fertilizer rates

处理	叶绿素 a/ (mg·g ⁻¹)	叶绿素 b/ (mg·g ⁻¹)	叶绿素 a+b/ (mg·g ⁻¹)	叶绿素 a/b	类胡萝卜素/ (mg·g ⁻¹)
K ₀	1.16±0.11 ^b	0.47±0.12 ^{ab}	1.63±0.22 ^b	2.56±0.40 ^a	0.27±0.04 ^{ab}
K ₁₈	1.25±0.14 ^{ab}	0.52±0.03 ^{ab}	1.77±0.17 ^{ab}	2.42±0.16 ^a	0.30±0.01 ^{ab}
K ₃₆	1.47±0.12 ^a	0.62±0.02 ^a	2.09±0.15 ^a	2.36±0.10 ^a	0.36±0.03 ^a
K ₅₄	1.09±0.12 ^b	0.45±0.11 ^b	1.54±0.23 ^b	2.52±0.47 ^a	0.24±0.02 ^b

注:同列不同小写字母表示不同钾肥用量处理间差异显著($P<0.05$),下表同。

2.3 不同钾肥用量对苇状羊茅抗氧化酶活性、可溶性蛋白和丙二醛含量的影响

钾肥施用影响了苇状羊茅叶片中过氧化物酶活性、可溶性蛋白和丙二醛含量,对过氧化氢酶活性的影响不显著(表 2)。其中,过氧化物活性 K₃₆ 最高,显著高于 K₀、K₅₄ ($P<0.05$),与 K₁₈ 之间的差异不显著;

可溶性蛋白含量 K₃₆ 显著高于不施钾肥的处理 K₀ ($P<0.05$),是 K₀ 的 2.43 倍,与其余两处理无统计学差异;丙二醛含量 K₃₆ 处理最低,与 K₁₈ 差异不显著,显著低于 K₀ 和 K₅₄ ($P<0.05$)。表明适量施用钾肥可提高抗氧化酶活性,增加可溶性蛋白含量,降低植株细胞伤害。

表 2 不同钾肥用量苇状羊茅抗氧化酶活性、可溶性蛋白和丙二醛含量
Table 2 Antioxidant enzyme activity, soluble protein and malondialdehyde content of *F. arundinacea* with different K fertilizer rates

处理	过氧化氢酶/ (U·min ⁻¹ ·mg ⁻¹)	过氧化物酶/ (U·min ⁻¹ ·mg ⁻¹)	可溶性蛋白/ (mg·g ⁻¹)	丙二醛/ (μmol·g ⁻¹)
K ₀	621.05±149.59 ^a	372.25±36.27 ^b	0.07±0.01 ^b	7.61±0.33 ^a
K ₁₈	779.64±16.86 ^a	527.67±115.23 ^{ab}	0.10±0.02 ^{ab}	6.94±0.29 ^{ab}
K ₃₆	804.32±116.40 ^a	608.00±46.31 ^a	0.17±0.02 ^a	5.35±0.63 ^b
K ₅₄	551.87±43.21 ^a	326.08±30.54 ^b	0.13±0.04 ^{ab}	7.69±1.01 ^a

2.4 不同钾肥用量对苇状羊茅钾素吸收与钾平衡的影响

钾肥用量显著影响苇状羊茅植株地上部钾的吸收。随钾肥用量的增加,植株地上部钾浓度和钾吸收均表现为先上升后下降的变化趋势(图 3)。钾肥用量与地上部钾浓度、钾吸收量之间的数学关系符合一元二次函数方程($P<0.01$)。由此函数方程可知,当达最大地上部钾浓度 12.9 g/kg 和最大钾吸收量 2.8 g/m² 时,相应的钾肥用量分别为 39.1 和 31.4 g/m²。

苇状羊茅生育期内,不同钾肥处理的钾表观平衡

差异显著,随钾肥用量的增加而增加。钾肥用量与钾表观平衡呈极显著的线性相关($P<0.001$)。由线性方程可知,当苇状羊茅栽培体系达到钾平衡状态时,钾肥用量为 2.1 g/m²(图 4)。

2.5 苇状羊茅地上部干物质累积与钾肥用量、钾吸收相关性分析

苇状羊茅收获期的地上部干物质质量与钾肥用量显著相关($P<0.001$),二者的数学关系可以用一元二次方程模拟(图 5-A)。根据此数学函数方程,苇状羊茅地上部最大干物质质量为 222.1 g/m²,获得最大干物质质量的钾肥用量为 28.4 g/m²。以获得地上部最大干

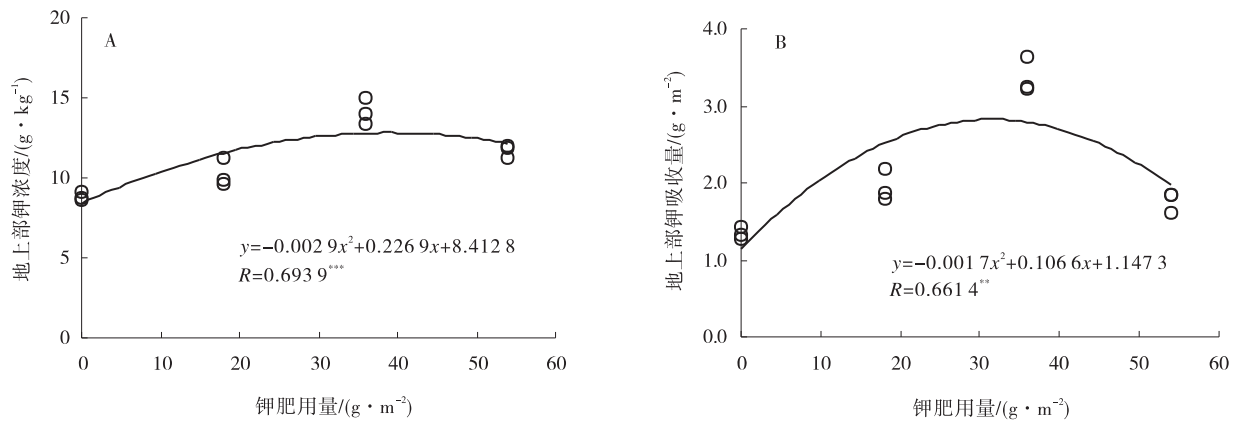


图3 不同钾肥用量苇状羊茅地上部钾素吸收

Fig. 3 Potassium absorption of *F. arundinacea* Schreb shoot with different K fertilizer rates

注:*, **, ***分别表示收获期地上部钾浓度、钾吸收量与钾肥用量相关性达显著($0.01 \leq P < 0.05$)、非常显著($0.001 \leq P < 0.01$)和极显著($P < 0.001$)水平。

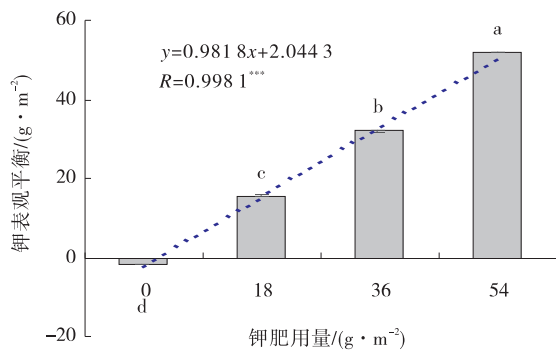


图4 不同钾肥处理钾表观平衡

Fig. 4 Apparent K balance of different K fertilizer treatments

注:不同小写字母表示不同钾肥用量处理间差异显著($P < 0.05$)。

物质质量的80%作为钾肥用量的适宜范围,则本试验条件下,钾肥的适宜用量为7.0~49.9 g/m²;钾肥用量<7.0 g/m²时,植株表现为钾缺乏;钾肥用量>49.9 g/m²,则表现为钾毒害现象(图5-B)。

地上部干物质质量与地上部钾浓度($0.001 \leq P < 0.01$)和钾吸收量($P < 0.001$)相关性均达极显著水平,其数学关系均符合线性方程,从二者线性方程的决定系数可知,地上部干物质的量可分别在52.9%和88.4%水平上由钾浓度和钾吸收量解释(图5-C, D)。将可获得的最大地上部干物质质量和80%、50%最大干物质质量带入干物质累积与钾浓度的线性方程 $y = 13.108x + 35.628$,计算得相应的地上部钾浓度,分别为14.2、10.8和5.8 g/kg,可用于地上部钾营养诊断。

3 讨论

3.1 钾肥施用对草坪草地上部生长的影响

植物生长会受到环境供钾水平的影响^[18],已有较多研究证明钾对植物生长的影响程度与土壤钾肥力水平和钾肥用量显著相关^[23-25]。本试验供试土壤低钾肥力水平下,随钾肥用量的增加,苇状羊茅各生育阶段的植株株高、干物质质量均呈先上升后下降的变化趋势,表明适量施用钾肥有利于促进苇状羊茅地上部生长,提高草坪质量,钾肥用量不足或过量施用对苇状羊茅地上部生长具有抑制作用,这一结果与Huai等^[26]和Philp等^[8]的研究结果一致。苇状羊茅不同生育阶段的株高增量和干物质累积速率存在较大差异,表现为出苗后50~137 d最大,0~50 d次之,137~200 d最小,这种植株生长的阶段性变化可能与植株本身的生长发育特性和温度、降雨等气候条件有关^[3,27-28]。

3.2 钾肥施用对草坪草生理特性的影响

当生存环境不利于植株生长的情况下,植物体内的活性氧代谢过程受到影响,造成大量的活性氧类物质累积,进而引发膜脂过氧化反应,对细胞膜造成破坏^[16]。有研究表明,施用钾肥可以通过影响植物自身的生理生化过程,如合成脯氨酸和可溶性糖等有机渗透物质调节植物细胞渗透压、提高活性氧清除系统如CAT、POD、SOD等酶的活性来缓解逆境伤害^[6,8]。本试验苇状羊茅在生长过程中不可避免地存在高温、低钾等环境胁迫,在出苗后137 d采集植株叶片进行生

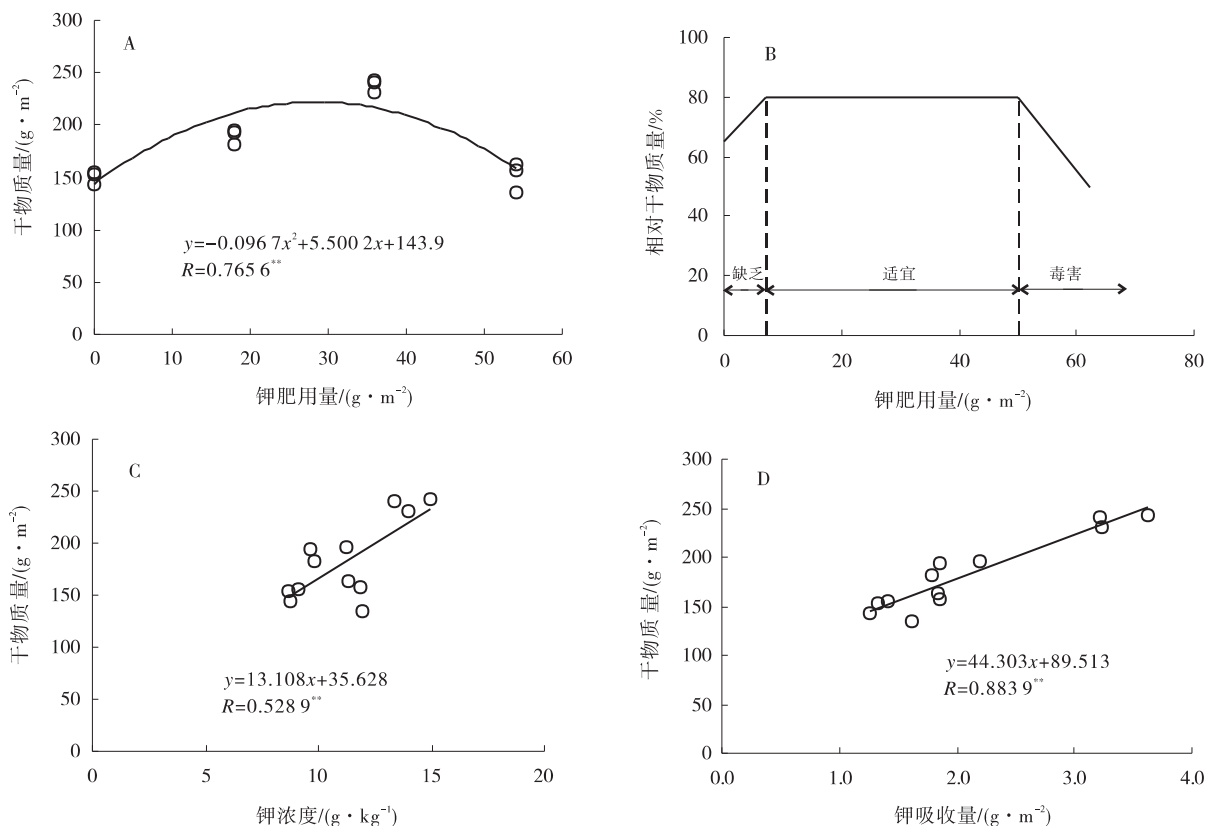


图5 苇状羊茅地上部干物质质量与钾肥用量、钾吸收的相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis of dry matter in *F. arundinacea* Schreb shoot with K fertilizer application rates and K absorption

注:*,**,***分别表示收获期干物质质量与钾肥用量、地上部钾浓度、钾吸收量相关性达显著($0.01 \leq P < 0.05$)、非常显著($0.001 \leq P < 0.01$)和极显著($P < 0.001$)水平(图5-A,C,D)。图5-B表示获得80%地上部干物质质量所缺乏、适宜和毒害的钾肥用量范围。

理生化指标测定,结果表明钾肥用量 36 g/m^2 可以显著提高叶片中 POD 活性和可溶性蛋白的含量,降低 MDA 含量,减轻环境胁迫对苇状羊茅的伤害程度,这与 Lisa 等^[27] 和 Shahid 等^[3] 研究结果一致,但本试验钾肥施用对植株叶片 CAT 活性的影响未达显著水平。

3.3 钾肥施用对草坪草钾吸收和钾平衡的影响

植物对钾的吸收除受自身遗传因素影响外,也与环境的供钾水平有关。在一定范围内,随环境供钾水平的升高,植物体内钾浓度和钾吸收量增加,但过量的钾供应则往往由于淀粉合成酶活性的潜在降低^[29],钾的外泌^[30],甚至产生离子毒害^[30],植物生长受到抑制,造成钾浓度和钾吸收量的下降。本试验苇状羊茅地上部钾浓度和钾吸收量均随钾肥用量的增加先上升后下降,当达最大地上部钾浓度 12.9 g/kg 和最大钾吸收量 2.8 g/m^2 时,相应的钾肥用量分别为 39.1 和 31.4 g/m^2 ,与获得最大地上部干物质质量的钾肥用量

28.4 g/m^2 相比,苇状羊茅达到最大生长量后存在钾的奢侈吸收,当钾肥用量超过 39.1 g/m^2 即可能伴随着植物细胞渗透平衡的破坏和钾的外泌等情况,造成植物组织钾浓度的降低。

农田生态系统的钾平衡是钾输入和钾输出的差值,有学者在只考虑肥料钾投入量和植物钾吸收量的情况下计算钾表观平衡,用于评价农田生态系统钾的环境淋失风险^[32]。本试验条件下,在苇状羊茅生育期内,不施钾肥处理的钾表观平衡为负值,表现为钾亏缺;随钾肥用量的增加,钾表观平衡呈线性增加,当达到钾平衡状态时,钾肥用量为 2.1 g/m^2 ;当钾肥用量超过 2.1 g/m^2 ,钾表观平衡为正值,表现为钾盈余,钾的环境淋失风险增加。由此可见,在草坪养护管理过程中,优化钾肥用量对减少钾素损失、提高钾肥利用效率十分重要。

3.4 钾肥施用对草坪适宜钾肥用量和植株钾营养诊

断指标的影响

在草坪等低投入农业系统中,通常将最大干物质产量的80%作为判断矿物质营养缺乏程度,确定最佳肥料用量和植物组织临界钾浓度的关键参考指标^[33]。本研究基于苇状羊茅地上部干物质累积量和钾肥用量的一元二次函数方程,采用养分丰缺指数法对植物进行营养诊断,得到苇状羊茅正常生长的适宜钾肥施用范围为7.0~49.9 g/m²,这一结果与Zörb等^[31]关于钾供应阈值较大的讨论是一致的。植物组织中的养分浓度通常用来判断植物的养分丰缺程度和指导施肥,本试验苇状羊茅地上部植物组织钾临界浓度为10.8 g/kg,这一临界值在大多数作物的钾临界浓度5.0~20 g/kg的范围内^[34],低于Huai等^[26]报道的不同供钾水平的土壤中高羊茅地上部钾临界浓度17.9和14.4 g/kg,这可能与植物种类、发育阶段和土壤钾肥力水平等因素有关^[33]。

4 结论

本试验条件下,1)钾肥用量36 g/m²有利于增加苇状羊茅植株地上部钾素养分吸收,提高叶片的光合色素含量、抗氧化酶(POD)活性和可溶性蛋白含量,降低丙二醛(MDA)含量,各生育阶段的植株株高和地上部干物质累积量最大,植株生长最好。2)钾表观损失随钾肥用量的增加而增大,苇状羊茅栽培体系达到钾平衡状态时的钾肥用量为2.1 g/m²,大量施用钾肥的情况下,钾的淋失风险增加。3)植株地上部干物质质量与钾肥用量和地上部钾浓度显著相关,钾肥用量7.0 g/m²和地上部钾浓度10.8 g/kg可作为钾肥用量推荐和植株钾营养诊断的参考指标应用于苇状羊茅的养护管理。

参考文献:

- [1] Römheld V, Kirkby E A. Research on potassium in agriculture: needs and prospects[J]. Plant and Soil, 2010, 335(1/2):155—180.
- [2] Mardanluo S, Souri M K, Ahmadi M. Plant growth and fruit quality of two pepper cultivars under different potassium levels of nutrient solutions[J]. Journal of Plant Nutrition, 2018, 41:1604—1614.
- [3] Shahid M, Saleem M F, Saleem A, *et al.* Foliar potassium—induced regulations in glycine betaine and malondialdehyde were associated with grain yield of heat—stressed bread wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2020, 20(1):1785—1798.
- [4] Nascimento K S, Edvan R L, Rodrigues A C C, *et al.* Evaluation of forage potential of tropical grasses under different potassium application times[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2021, 52(6):551—562.
- [5] Shahid M, Saleem M F, Saleem A, *et al.* Exogenous potassium—instigated biochemical regulations confer terminal heat tolerance in wheat[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2019, 19(1):137—147.
- [6] Tewari R K, Yadav N, Gupta R, *et al.* Oxidative stress under macronutrient deficiency in plants[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2021, 21(1):832—859.
- [7] 冀宏杰, 张怀志, 张维理, 等. 我国农田土壤钾平衡研究进展与展望[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(6):920—930.
- [8] Philp J N M, Cornish P S, Te K S H, *et al.* Insufficient potassium and sulfur supply threaten the productivity of perennial forage grasses in smallholder farms on tropical sandy soils[J]. Plant and Soil, 2021, 461(1/2):617—630.
- [9] 范海荣, 吴素霞, 常连生. 秦皇岛市草坪土壤肥力数值化综合评价与对策研究[J]. 草业科学, 2013, 30(1):9—15.
- [10] Komosa A, Szewczuk A. Effect of soil potassium level and different potassium fertilizer forms on nutritional status, growth and yield of apple trees in the first three years after planting[J]. Journal of Fruit & Ornamental Plant Research, 2002, 10(2):41—54.
- [11] FAOSTAT [EB/OL] [2023—07—11]/[2023—08—26]. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/RFN>.
- [12] 牛新生, 王安建, 郑绵平. 中国钾盐消费规律与需求预测[J]. 中国矿业, 2019, 28(10):6—12, 33.
- [13] Born I, Andrist-Rangel Y, Askegaard M, *et al.* Critical aspects of potassium management in agricultural systems[J]. Soil Use and Management, 2006, 21:102—112.
- [14] 张福锁, 崔振岭, 陈新平. 最佳养分管理技术列单[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [15] 鲁剑巍, 王正银, 张洋洋. 主要作物缺钾症状与施钾技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017.
- [16] 陈雅琦, 苏楷淇, 李春杰. 盐胁迫对2种冷季型草坪草幼苗生长和生理特性的影响[J]. 草原与草坪, 2021, 41(3):32—40.

- [17] 王昕慧,孙晓阳,李勋,等. 钾素增强干旱胁迫下草地早熟禾生理耐性的机制[J]. 中国草地学报,2018,40(4): 23—29.
- [18] Schmid C J,Clarke B B,Murphy J A. Potassium nutrition affects anthracnose on annual bluegrass [J]. Agronomy Journal,2018,110(6):2171—2179.
- [19] Ihtisham M,Fahad S,Luo T, *et al.* Optimization of nitrogen,phosphorus,and potassium fertilization rates for overseeded perennial ryegrass turf on dormant bermudagrass in a transitional climate[J]. Frontiers in Plant Science,2018,9(2):1—14.
- [20] 伊然,王子玥,刘凌云,等. 基于EST—SSR标记的60份苇状羊茅遗传多样性分析[J]. 草地学报,2023,31(7): 2041—2048.
- [21] 娄燕宏,王会,宋付朋,等. 115份高羊茅种质资源农艺性状特征分析[J]. 草原与草坪,2017,37(1):31—37+43.
- [22] 李合生. 植物生理生化实验原理与技术[M]. 北京: 高等教育出版社,2000.
- [23] Bier P V,Malachi P,Paul K, *et al.* A long term evaluation of differential potassium fertilization of a creeping bentgrass putting green[J]. Plant and Soil,2018,431(1/2):303—316.
- [24] Dokbua B,Waramit N,Chaugool J, *et al.* Biomass productivity, developmental morphology, and nutrient removal rate of hybrid napier grass (*Pennisetum purpureum* × *Pennisetum americanum*) in response to potassium and nitrogen fertilization in a multiple—harvest system [J]. BioEnergy Research,2021,14(4):1106—1117.
- [25] Monika K,Hanna B,Włodzimierz B. Response of lawn grasses to salinity stress and protective potassium Effect [J]. Agronomy,2021,11(5):843.
- [26] Huai T T,Xu S X,Zhang S, *et al.* Effects of potassium fertilizer application on *Festuca arundinacea* I: plant growth and potassium requirement[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition,2022,22(4): 5246—5256.
- [27] Lisa C,Stefania M,Monica G, *et al.* Effects of water stress on spectral reflectance of bermudagrass[J]. Scientific Reports,2020,10(1):15055.
- [28] Magandana T P,Hassen A,Tesfamariam E H. Seasonal herbaceous structure and biomass production response to rainfall reduction and resting period in the semi—arid grassland area of South Africa[J]. Agronomy,2020,10,(11):1807.
- [29] Preusser E,Khalil F A,Göring H. Regulation of activity of the granule—bound starch synthetase by monovalent cations[J]. Biochemie und Physiologie der Pflanzen,1981,176:744—752.
- [30] Peng Y,Yu P,Zhang Y, *et al.* Temporal and spatial dynamics in root length density of field—grown maize and NPK in the soil profile[J]. Field Crops Research,2012,131:9—16.
- [31] Zörb C, Senbayram M, Peiter E. Potassium in agriculture—status and perspectives[J]. Journal of Plant Physiology,2014,171(9):656—669.
- [32] Lu D J,Dong Y H,Chen X Q, *et al.* Comparison of potential potassium leaching associated with organic and inorganic potassium sources in different arable soils in China [J]. Pedosphere,2022,32(2): 330—338.
- [33] 李春俭. 高级植物营养学[M]. 北京: 中国农业大学出版社. 2008:254—261.
- [34] Leigh R A,Wyn Jones R G. A hypothesis relating critical potassium concentrations for growth to the distribution and functions of this ion in the plant cell[J]. New Phytologist,1984,97:1—13.

Effects of potassium fertilizer application on the growth and physiology characteristics and potassium uptake of *Festuca arundinacea*

ZHU Xiao-ling, ZHAO Xin-yan, MI Ming, ZHU Chun-xiao, CHEN Meng-yao, WU Chuan-yue, WU Xin-yu, LI Wen-jing, SI Dong-xia*

(School of Agricultural Science and Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 2520591, China)

Abstract:【Objective】To elucidate the impact of potassium (K) fertilizer application on the growth and physiology characteristic of *Festuca arundinacea*, and to establish the appropriate K fertilizer application rate and K nutrition diagnosis index. 【Method】A pot experiment was conducted to investigate the responses of shoot growth, physiology and K absorption characteristics in *Festuca arundinacea* under various K application rates (0, 18, 36, 54 g/m²). 【Result】With an increase in K fertilizer application, the plant height and dry matter accumulation in the shoot at each growth stage exhibited an initial increase followed by a decrease, reaching their maximum value at a K application rate of 36 g/m². The plant height increment and dry matter accumulation rate were notably higher at 50~137 days and 0~50 d after emergence. The application of K fertilizer 36 g/m² proved beneficial for enhancing K absorption in the plant shoot, elevating photosynthetic pigment content, antioxidant enzyme (POD) activity, soluble protein content in the leaves, while reducing malondialdehyde (MDA) content. However, it is noteworthy that an excessive amount of K fertilizer increased the risk of K loss in the cultivation system of *Festuca arundinacea*. The optimal range for K fertilizer application in promoting *Festuca arundinacea* growth was found to be 7.0~49.9 g/m², with the critical K concentration required for 80% of the maximum shoot dry matter accumulation identified as 10.8 g/kg. 【Conclusion】The application of K fertilizer exerted significant effects on the growth and physiological characteristics of *Festuca arundinacea*. The potassium application rate of 7.0 g/m² and the K concentration of 10.8 g/kg in plant shoot could serve as valuable references for K fertilizer recommendation and K nutrition diagnosis in the conservation and management of *Festuca arundinacea*, respectively.

Key words: potassium fertilizer; *Festuca arundinacea*; growth and physiological characteristics; potassium absorption; suitable application rate of potassium fertilizer; potassium nutrition diagnosis

(责任编辑 刘建荣)