

# 不同灌水量下限对高羊茅绿期及抗寒性生理指标的影响\*

刘立军 陈为峰\*\* 王 凯 张呈祥

(山东农业大学资源与环境学院, 山东泰安 271018)

**摘 要** 采用盆栽试验的方法,研究了秋末冬初不同灌水量下限[分别占田间持水量(FC)的80%、70%、60%、50%]对高羊茅绿期及抗寒性生理指标的影响.结果表明:在冬季低温条件下,80%和70%FC灌水处理使高羊茅叶片相对含水量、保护酶(SOD、POD和CAT)活性、叶绿素、可溶性糖和游离脯氨酸含量维持在较高水平,丙二醛含量和电解质外渗率降低,高羊茅的抗寒性增强.80%FC灌水处理分别较70%、60%和50%FC处理的草坪草绿期延长4、22和28 d,到达枯黄休眠的时间最晚,完成返青的时间最早.综合考虑节水和提高水分利用效率等多种因素,70%FC灌水处理为高羊茅秋末冬初季节最佳的灌水量下限.

**关键词** 灌水量下限 高羊茅 绿期 抗寒性 水分利用效率

**文章编号** 1001-9332(2012)01-0038-07 **中图分类号** S688.4 **文献标识码** A

**Effects of different irrigation minima on green period and cold-resistance physiological indices of *Festuca arundinacea*.** LIU Li-jun, CHEN Wei-feng, WANG Kai, ZHANG Cheng-xiang (College of Resource and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, Shandong, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2012, 23(1): 38-44.

**Abstract:** A pot experiment was conducted to study the effects of different irrigation minima [80% field capacity (FC), 70% FC, 60% FC and 50% FC] from late autumn to early winter on the green period and cold-resistance of *Festuca arundinacea*. Under the low temperature in winter, treatments 80% FC and 70% FC made the leaf relative water content, POD, CAT, and SOD activities, and chlorophyll, soluble sugar, and free proline contents of *F. arundinacea* maintained at a higher level, but made the MDA content and electrolyte leakage decreased, resulting in an increased cold-resistance of *F. arundinacea*. Treatment 80% FC made the green period of *F. arundinacea* prolonged by 4, 22 and 28 days, as compared with treatments 70% FC, 60% FC, and 50% FC, respectively, and made *F. arundinacea* have the shortest time to wither in winter and to turn green in spring, with the longest green period. Taking water-saving and water use efficiency into consideration, 70% FC would be the optimum irrigation low limit from late autumn to early winter for *F. arundinacea*.

**Key words:** irrigation low limit; *Festuca arundinacea*; green period; cold resistance; water use efficiency.

受草坪草遗传、地区气候等因素的影响,诸多暖温带地区草坪绿期受到很大制约.如何延长草坪草的绿期,增加草坪的景观和使用价值,一直是国内外众多草坪研究者和管理人员关注的问题.目前,延长草坪绿期的常用方法主要有交播<sup>[1]</sup>、植物生长调节剂<sup>[2-3]</sup>、抗寒品种选育<sup>[4-5]</sup>、地下加热<sup>[6]</sup>、冬季覆盖保

温<sup>[7-8]</sup>等措施.这些方法虽有一定效果,但也有一定的局限性,而且会大幅度增加草坪的养护成本.

灌水 is 草坪最常规的管理措施之一.草坪质量与水分的供给密切相关,在降雨有限的情况下,草坪质量在很大程度上取决于灌溉水供应<sup>[9]</sup>.土壤含水量不仅直接影响草坪草的生长发育,而且会对草坪草的生理指标和过程产生极其重要的影响<sup>[10-11]</sup>.灌水量下限指土壤水分适宜的下限值,是管理者灌溉时制定的适于植物生长的最低土壤水分限量,冬季低

\* 国家环保公益性行业科研专项(200809047)资助.

\*\* 通讯作者. E-mail: chwef@sdau.edu.cn

2011-06-06 收稿,2011-10-11 接受.

温胁迫下,不同的灌水下限会对草坪草质膜过氧化水平和叶绿素含量产生影响,进而影响到草坪草质膜的功能及叶片的光合作用.适当的灌水下限可以使草坪草积累可溶性糖和脯氨酸等渗透调节物质,降低低温对质膜的伤害,提高草坪草体内抗氧化防御系统的活性,消除活性氧给草坪草带来的伤害<sup>[12]</sup>,增强抗寒能力和延长绿期.观察不同灌水下限处理下草坪草秋冬季节枯黄及早春季节返青的动态变化,可为研究草坪节水灌溉提供最直接的数据支持.本文以北方地区常用的冷季型草坪草高羊茅(*Festuca arundinacea*)为研究对象,采用秋末冬初不同灌水下限管理措施开展冬季保绿效果试验,试图找出最佳的灌水下限,以期为北方地区草坪秋末冬初的科学灌水管理提供参考.

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地点设在地处山东省泰安市的山东农业大学南校区试验站(36°10'14" N、117°08'55" E).该地区年均气温 12.9℃.7 月最高气温平均 26.4℃,1 月最低气温平均-2.6℃.极端最高气温 41℃,极端最低气温-27.5℃.≥0℃年积温 4731℃,≥10℃年积温 4213℃,无霜期最长达 241 d、最短为 161 d.年均降水量 697 mm.土壤为棕壤,含速效氮 81.35 mg·kg<sup>-1</sup>、速效磷 64.73 mg·kg<sup>-1</sup>、速效钾 57.38 mg·kg<sup>-1</sup>、硝态氮 14.54 mg·kg<sup>-1</sup>、pH 值 6.34.

1.2 试验设计

供试高羊茅品种为‘千年盛世’(Millennium),由山东泰安恒源大地景观工程有限公司提供.

本试验采用盆栽设计,盆高 25 cm、半径 10 cm,田间持水量(FC)为 25.7%.设 4 个灌水下限水平:80% FC、70% FC、60% FC、50% FC,分别记为 W<sub>1</sub>、W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>、W<sub>4</sub>,每个处理重复 6 次.草坪于 2009 年 7 月建坪,播种量 20 g·m<sup>-2</sup>,在自然条件下管理和试验.建坪后每盆施用尿素 8 g·m<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 4 g·m<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 4 g·m<sup>-2</sup>.从 2009 年 9 月高羊茅分蘖后开始,每天测量各盆土壤含水量,当土壤含水量降到设定的灌水下限时开始灌水至田间持水量为止,湿润深度 30 cm,灌溉量以 1%天平计量,直至草坪土壤结冰.从 11 月 20 日开始生理采样,采样时间为 9:00,取草坪草中部的健壮叶片,置于冰盒中带到实验室,用冷蒸馏水漂洗干净,吸水纸擦干,进行生理指标测定.此后每隔 15 d 取样一次,共取 4 次.取样时田间即时温度分别为 8、3、0、-3℃,当日最低气温分别

为 4、1、-5、-9℃.枯黄动态观测从 11 月 22 日开始,直至全部处理进入枯黄期,返青动态观测从翌年的 1 月 31 日开始,直至全部处理完成返青.

1.3 测定项目及方法

依照 NTEP(National Turfgrass Evaluation Program)草坪质量评定体系的标准,绿期以草坪返青达到 80%起至枯黄休眠达到 80%为止的持续天数.选取参试材料中正常生长的 20 个株丛,用于观测草坪草秋季枯黄、春季返青动态.将采集的株丛图像先利用 Adobe Photoshop 7.0 软件,截取图像中具有代表性的部分,以 bmp 或 psd 格式保存;再采用 Sigmascan Pro 5.0 软件计算枯黄率,取平均值<sup>[13]</sup>.计算公式为:

枯黄率=黄色像素点数 / (黄色像素点数+绿色像素点数) × 100%

返青率=绿色像素点数 / (绿色像素点数+黄色像素点数) × 100%

叶片相对水含量和叶片相对电导率(EL)的测定参照李合生等<sup>[14]</sup>的方法,丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法测定,叶片超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑光还原法测定,过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法测定,过氧化氢酶(CAT)活性采用过氧化氢分解量法测定.游离脯氨酸(Pro)采用酸性茚三酮显色法测定,可溶性糖含量采用蒽酮法测定,叶绿素采用丙酮法测定<sup>[15]</sup>.

1.4 数据处理

采用 Excel 和 SAS 软件分析不同灌水下限处理与高羊茅绿期及抗寒性生理指标的关系,应用最小显著差异法(LSD)对不同处理进行多重比较分析,数据以平均值±标准差(mean±SD)形式呈现.

2 结果与分析

2.1 不同灌水下限处理对高羊茅绿期的影响

2.1.1 高羊茅草坪冬季枯黄动态 由图 1 可以看出,随气温的逐渐降低,高羊茅枯黄率表现出“慢-快-慢”的升高趋势.在 2009 年 12 月 16 日之前,各处理枯黄率均在 10% 以下,且无显著差异;从 12 月 20 日开始,随着温度的逐渐降低,各处理的枯黄率显著增加.2010 年 1 月 1 日, W<sub>4</sub> 处理的枯黄率 ≥80%,表明 W<sub>4</sub> 处理进入枯黄期;1 月 5 日, W<sub>3</sub> 处理枯黄率超过 80%,进入枯黄期;而 W<sub>1</sub> 和 W<sub>2</sub> 处理枯黄率分别为 72.2%、74.1%,在 1 月 13 日达到 80%,较 W<sub>4</sub>、W<sub>3</sub> 分别延迟了 12 和 8 d.

2.1.2 高羊茅草坪春季返青动态变化 在整个返青

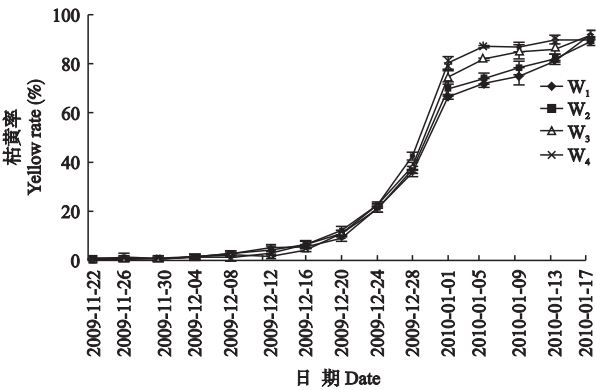


图1 不同灌水下限处理对高羊茅冬季枯黄率的影响  
**Fig.1** Effects of different irrigation minima on yellow rate of *Festuca arundinacea* in winter.  
W<sub>1</sub>:80% FC; W<sub>2</sub>:70% FC; W<sub>3</sub>:60% FC; W<sub>4</sub>:50% FC. 下同 The same below.

过程中,高灌水下限处理的返青率始终高于低灌水下限处理(图2).在2月20日之前,各处理返青较缓慢,均未达到显著水平.2月24日之后,各处理返青率急剧上升,以处理W<sub>1</sub>返青速度最快,分别较处理W<sub>3</sub>、W<sub>4</sub>提高了37.3%、54.6%,差异显著.3月8日时,处理W<sub>1</sub>返青率达到80%,完成返青.W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>、W<sub>4</sub>返青率达到80%的日期分别为3月12日、3月20日和3月24日.与处理W<sub>4</sub>相比较,W<sub>1</sub>和W<sub>2</sub>返青分别提前了16和14 d,较处理W<sub>3</sub>分别提前14和12 d.综合图1所示,处理W<sub>1</sub>较W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>、W<sub>4</sub>分别延长绿期4、22和28 d.这说明较高的草坪灌水下限处理可以延缓高羊茅进入枯黄休眠的时间,提前高羊茅完成返青的时间,对延长高羊茅绿期具有良好的效果.

2.2 不同灌水下限处理对高羊茅抗寒性生理指标的影响

2.2.1 高羊茅叶片相对含水量 相对含水量是反映

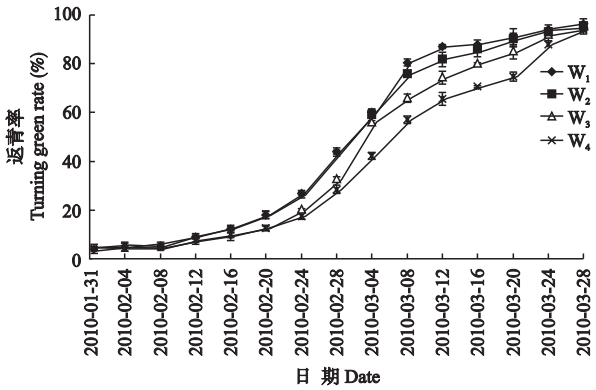


图2 不同灌水下限处理对高羊茅春季返青率的影响  
**Fig.2** Effects of different irrigation minima on turning green rate of *Festuca arundinacea* in spring.

植物体内水分状况的重要参数,叶片相对含水量的多少直接影响植物的生长状况<sup>[16]</sup>.由图3可以看出,在11月20日,处理W<sub>1</sub>和W<sub>4</sub>的相对含水量较W<sub>3</sub>分别降低5.3%、4.3%,差异显著,说明正常温度下,过高或过低的灌水处理都会影响高羊茅的相对含水量,进而影响其正常生长.随着冬季温度的逐步降低,各处理叶片的相对含水量逐渐降低,至12月5日W<sub>1</sub>、W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>和W<sub>4</sub>分别降低了25.8%、22.8%、34.0%和34.4%,高的灌水下限处理减缓了高羊茅含水量的下降.因此,在秋末冬初适当提高灌水下限对减缓高羊茅含水量的下降和促进其正常生长具有重要作用.

2.2.2 高羊茅叶绿素含量 叶绿素含量反映了植物光合同化的能力,是衡量草坪草质量和抗寒力高低的重要生理指标之一,与草坪绿期也有着直接的关联<sup>[17]</sup>.由图4可以看出,随着外界气温的降低,高羊茅叶片内叶绿素a、b和类胡萝卜素的含量呈先升后降的趋势,叶绿素a/b呈现逐渐增加趋势.

11月20日,由于外界气温较高,各处理高羊茅体内叶绿素a、b及类胡萝卜素含量均无显著变化.随着温度的降低,12月20日,处理W<sub>1</sub>和W<sub>2</sub>的叶绿素a含量较处理W<sub>4</sub>分别提高17.2%、21.8%,至隆冬的1月4日,两处理的叶绿素a含量仍较处理W<sub>4</sub>高14.8%、13.0%,达显著水平.在整个试验过程中,处理W<sub>1</sub>、W<sub>2</sub>和W<sub>3</sub>的叶绿素b含量均无显著性变化.但在12月5日、20日和翌年1月4日,处理W<sub>1</sub>的叶绿素b含量分别较处理W<sub>4</sub>提高33.3%、31.6%和41.7%,差异显著.受低温的影响,高羊茅体内类胡萝卜素含量同样呈现下降趋势.其中1月4日,各处理类胡萝卜素含量顺序为W<sub>2</sub>>W<sub>1</sub>>W<sub>3</sub>>W<sub>4</sub>;随着温度的降低,叶绿素a/b值出现增加趋势,

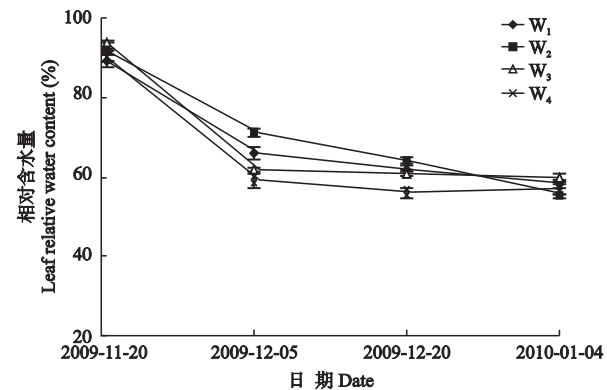


图3 不同灌水下限处理对高羊茅相对含水量的影响  
**Fig.3** Effects of different irrigation minima on leaf relative water content of *Festuca arundinacea*.

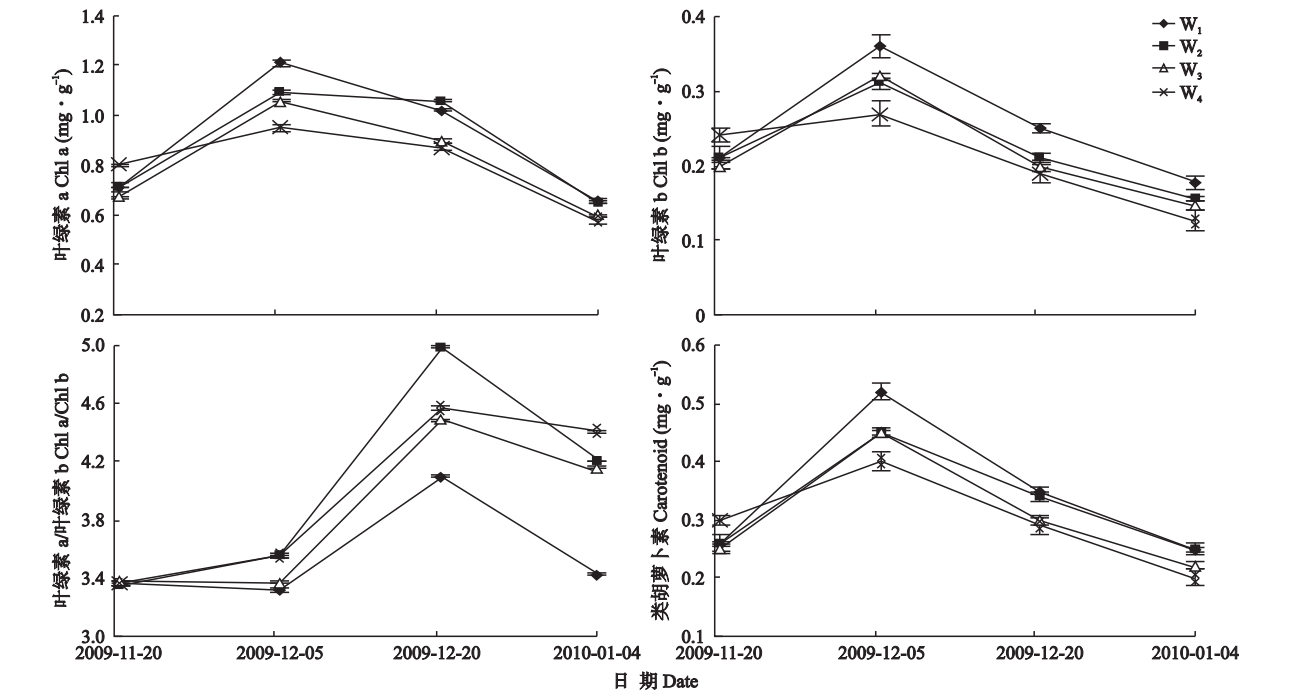


图 4 不同灌水下限处理对高羊茅叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素含量及叶绿素 a/b 的影响  
Fig. 4 Effects of different irrigation minima on Chl a, Chl b, carotenoid contents and Chl a/Chl b of *Festuca arundinacea*.

但处理间均未达到显著水平. 由此可见,低温下高的灌水下限处理可以减缓高羊茅体内叶绿素 a、b 及类胡萝卜素含量的下降,对提高高羊茅绿期有显著影响.

**2.2.3 高羊茅相对电导率和丙二醛含量** 当植物受低温胁迫时,电解质大量外渗,细胞质膜受损,MDA 大量积累. 因此,电解质外渗率和 MDA 含量能够反映植物遭受冷害的程度和植物抗冷性的强弱<sup>[18-20]</sup>. 由表 1 可以看出,随着冬季气温的降低,各处理叶片的相对电导率逐渐升高. 进入 12 月以后,70% 和 80% FC 灌水下限处理的高羊茅相对电导率均显著低于 50% FC 处理. 说明在秋末冬初,适当提高高羊茅的灌水下限可以降低低温对高羊茅细胞膜造成的

伤害.

11 月 20 日,由于气温较高,高羊茅基本不受低温危害,各处理 MDA 含量的依次为:W<sub>4</sub>>W<sub>1</sub>>W<sub>2</sub>>W<sub>3</sub>,处理间虽未达到显著水平,但处理 W<sub>1</sub> 和 W<sub>4</sub> 的 MDA 含量较高,说明 80% FC 和 50% FC 的灌水下限均能对高羊茅造成一定伤害. 随着温度的降低,各处理 MDA 含量逐渐升高,到翌年 1 月 5 日时,处理 W<sub>1</sub>、W<sub>2</sub> 和 W<sub>3</sub> 与处理 W<sub>4</sub> 之间均达到显著水平,其中以处理 W<sub>2</sub> 的 MDA 含量最少,较 W<sub>4</sub> 降低了 47.8%. 这说明低灌水下限处理可以使细胞质膜受损,质膜过氧化程度提高;高灌水下限处理可以降低低温细胞膜的受损程度,提高高羊茅的抗寒性,延长绿期.

**2.2.4 高羊茅游离脯氨酸和可溶性糖含量** 当植物

表 1 不同灌水下限处理对高羊茅相对电导率和丙二醛含量的影响  
Table 1 Effects of different irrigation minima on relative electric conductivity and MDA content of *Festuca arundinacea*

项目 Item	处理 Treatment	日期 Date			
		2009-11-20	2009-12-05	2009-12-20	2010-01-05
电导率 Relative electric conductivity ( % )	W <sub>1</sub>	17. 01±0. 86ab	33. 57±1. 95a	36. 86±0. 81ab	39. 11±0. 9b
	W <sub>2</sub>	18. 40±2. 79a	28. 34±1. 19b	33. 85±0. 94bc	35. 52±0. 82c
	W <sub>3</sub>	13. 10±0. 96b	28. 35±0. 76b	30. 92±1. 85c	37. 83±0. 83bc
	W <sub>4</sub>	13. 73±0. 83ab	35. 60±1. 57a	40. 88±1. 62a	43. 13±0. 65a
丙二醛 MDA ( μg · mg <sup>-1</sup> FM )	W <sub>1</sub>	4. 83±0. 99a	6. 19±1. 07ab	7. 54±1. 18b	11. 54±0. 93b
	W <sub>2</sub>	4. 73±0. 27a	6. 59±0. 39ab	6. 37±0. 12b	10. 20±0. 41b
	W <sub>3</sub>	4. 62±0. 56a	4. 85±0. 70b	8. 59±0. 93ab	11. 01±0. 78b
	W <sub>4</sub>	4. 96±0. 76a	8. 63±1. 01a	10. 71±0. 07a	15. 08±0. 44a

W<sub>1</sub>:80% FC; W<sub>2</sub>:70% FC; W<sub>3</sub>:60% FC; W<sub>4</sub>:50% FC. 同列中不同小写字母表示差异显著 (P<0. 05) Different small letters in the same column indicated significant at 0. 05 level. 下同 The same below.



处于逆境胁迫时会使游离脯氨酸含量迅速增加,细胞液的浓度提高,从而增强其抗逆性,所以游离脯氨酸是衡量植物抗性的重要指标<sup>[21]</sup>. 由表 2 可以看出,60% FC 灌水下限处理下,各时期高羊茅叶片游离脯氨酸含量均呈现最小值,其中,12 月 5 日分别较处理 W<sub>1</sub>和 W<sub>4</sub>降低了 28.1%、25.3%;12 月 20 日较处理 W<sub>2</sub>和 W<sub>4</sub>降低了 15.3%、20.9%,均达到显著水平. 随着温度的降低,处理 W<sub>4</sub>游离脯氨酸含量逐渐升高,且一直保持较高水平.

各种逆境胁迫下,可溶性糖加速积累并对植株起保护作用<sup>[22]</sup>. 在不同灌水下限处理及低温胁迫下,高羊茅代谢产生的糖逐渐增加,并表现出一定的规律性(表 2). 12 月 5 日之前,由于温度较高,处理 W<sub>1</sub>的可溶性糖含量最低,未达到显著水平. 随着温度的进一步下降,各处理的可溶性糖含量呈缓慢上升趋势,12 月 20 日时各处理的可溶性糖含量顺序为:W<sub>2</sub>>W<sub>4</sub>>W<sub>1</sub>>W<sub>3</sub>,其中处理 W<sub>2</sub>的可溶性糖含量显著高于其他处理. 处理 W<sub>4</sub>的可溶性糖含量变化与游离脯氨酸相同,始终保持在较高水平.

**2.2.5 高羊茅 SOD、CAT 和 POD 活性** 低温胁迫下,草坪草活性氧的产生与清除之间的平衡会被破坏,膜的结构和功能遭到破坏,引起一系列生理生化代谢紊乱,导致伤害发生<sup>[23-24]</sup>. SOD、POD 和 CAT 均属于清除活性氧的保护酶,SOD 可消除植物组织中过多的氧自由基,使之转化成H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>;而 CAT 和 POD 能有效地移走 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,三者协同作用能将 O<sub>2</sub><sup>-</sup>和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>转化为 H<sub>2</sub>O 和 O<sub>2</sub>. 草坪草通过这 3 种氧化酶的协同作用来清除体内自由基和活性氧,可以减弱不良环境带来的伤害,因此其酶活性与草坪抗性呈一定的相关性.

由表 3 可以看出,整体上,处理 W<sub>1</sub>、W<sub>2</sub>和 W<sub>3</sub>的 SOD 和 POD 活性均随时间的推迟呈现 12 月初先升高,然后逐渐下降的趋势,CAT 活性表现持续下降,处理 W<sub>4</sub>的 SOD 活性则出现持续下降的趋势. 11 月 20 日,处理 W<sub>4</sub>的 SOD 活性较 W<sub>1</sub>、W<sub>2</sub>分别高出 12.7%、7.3%,差异显著. 表明 50% FC 灌水下限已经对高羊茅的生长造成了危害. 12 月 20 日,处理

表 2 不同灌水下限处理对高羊茅游离脯氨酸和可溶性糖含量的影响  
Table 2 Effects of different irrigation minima on free proline and soluble sugar contents of *Festuca arundinacea*

渗透调节物质 Osmotic adjustment material	处理 Treatment	日期 Date			
		2009-11-20	2009-12-05	2009-12-20	2010-01-05
游离脯氨酸 Free proline (mg · g <sup>-1</sup> FM)	W <sub>1</sub>	2.86±0.42a	4.15±0.31a	4.45±0.20bc	5.16±0.13a
	W <sub>2</sub>	3.47±0.20a	3.86±0.17ab	4.75±0.16ab	4.89±0.20a
	W <sub>3</sub>	4.59±0.58a	3.24±0.18b	4.12±0.05c	4.81±0.22a
	W <sub>4</sub>	3.67±0.11a	4.06±0.08a	4.98±0.11a	5.28±0.17a
可溶性糖 Soluble sugar content (mg · g <sup>-1</sup> FM)	W <sub>1</sub>	4.70±0.47a	5.26±0.07ab	5.82±0.44ab	6.74±0.25ab
	W <sub>2</sub>	5.18±0.26a	5.94±0.59a	6.81±0.47a	7.76±0.69a
	W <sub>3</sub>	5.23±0.24a	4.35±0.25b	5.27±0.14b	5.99±0.19b
	W <sub>4</sub>	5.13±0.27a	5.69±0.41a	6.38±0.17ab	6.40±0.35ab

表 3 不同灌水下限处理对高羊茅 SOD、CAT 和 POD 活性的影响  
Table 3 Effects of different irrigation minima on SOD, POD and CAT activities of *Festuca arundinacea*

保护酶 Protective enzyme	处理 Treatment	日期 Date			
		2009-11-20	2009-12-05	2009-12-20	2010-01-05
超氧化物歧化酶活性 SOD activity (U · g <sup>-1</sup> FM · h <sup>-1</sup> )	W <sub>1</sub>	181.30±3.46c	186.61±3.84b	115.03±5.10ab	88.48±4.61a
	W <sub>2</sub>	190.38±1.57bc	193.69±2.78b	120.49±5.24a	86.39±2.14a
	W <sub>3</sub>	194.55±2.03ab	207.66±1.32a	108.69±1.20b	87.55±2.02a
	W <sub>4</sub>	204.31±3.44a	195.25±0.48b	95.77±3.08c	77.59±1.74a
过氧化物酶活性 POD activity (ΔA <sub>470</sub> · min <sup>-1</sup> · g <sup>-1</sup> FM)	W <sub>1</sub>	7.37±0.37a	32.59±1.60a	28.49±2.86a	11.22±0.71a
	W <sub>2</sub>	6.96±0.15a	28.16±4.99a	26.44±0.89ab	11.92±1.32a
	W <sub>3</sub>	7.31±0.98a	26.65±1.13a	25.97±1.85ab	11.71±0.86a
	W <sub>4</sub>	7.77±0.93a	25.70±0.90a	21.35±0.61b	8.13±0.64a
过氧化氢酶活性 CAT activity (ΔA <sub>240</sub> · min <sup>-1</sup> · g <sup>-1</sup> FM)	W <sub>1</sub>	9.50±0.34a	9.27±0.24a	8.04±0.30a	5.16±0.30a
	W <sub>2</sub>	9.26±1.32a	9.20±0.79a	7.75±0.29a	5.22±0.40a
	W <sub>3</sub>	8.87±0.58a	6.59±0.68b	5.85±0.42b	4.48±0.80a
	W <sub>4</sub>	8.40±1.40a	8.37±0.71a	5.65±0.34b	4.69±0.73a

$W_1$  的 POD 和 CAT 活性较处理  $W_4$  分别提高了 33.4%、42.3%, 达到显著水平。进入 12 月后, 随着温度的进一步降低, SOD、POD 和 CAT 活性持续下降, 其清除活性氧的能力逐步减弱, 导致高羊茅体内 MDA 含量增加, 伤害加剧, 这与 MDA 随温度下降而逐渐升高的变化相吻合。各种灌水下限处理中, 以处理  $W_1$  和  $W_2$  保护性酶活性最高, 高羊茅抵抗低温危害的能力最强, 因而延长高羊茅绿期的效果最佳。

### 3 讨 论

灌水下限决定着作物灌水的开始时间和灌水次数, 也影响灌水量的确定<sup>[25]</sup>, 对草坪草的生长具有重要意义。草坪体内相对含水量是反映草坪体内水分状况的重要参数, 直接影响草坪草的生长。本研究结果表明, 在秋末冬初, 80% 和 70% FC 灌水下限处理能显著提高高羊茅体内的相对水含量, 为其正常生长奠定了基础。

Penuelas 和 Filella<sup>[26]</sup> 研究指出, 光合色素含量与生理胁迫相关, 胁迫和衰老情况下, 叶绿素含量均会下降。本试验中, 叶绿素 a、b 和类胡萝卜素的含量变化基本一致, 均表现出先升高后降低的趋势。叶绿素 a/b 呈现出逐渐增大的趋势, 表明叶绿素 b 受到的伤害较叶绿素 a 大。Okawara 和 Kanek<sup>[27]</sup> 研究发现, 低温胁迫下, 类胡萝卜素能抵抗结缕草 (*Zoysia japonica*) 叶片中光抑制现象, 从而对植物体起着一定的保护作用。本试验中, 80% FC 灌水下限处理的类胡萝卜素含量最高, 对减少高羊茅的抗寒性光抑制起到了重要作用。

低温胁迫下, 草坪草细胞膜会发生膜脂过氧化作用, 其最终产物为 MDA。MDA 大量积累会造成膜透性增加, 细胞内物质外渗, 相对电导率增大, 加剧伤害<sup>[18,28]</sup>。为减轻低温带来的伤害, 草坪草须提高 SOD、POD 和 CAT 活性来清除过多的自由基。同时, 积累游离脯氨酸和可溶性糖, 提高细胞液浓度, 增强质膜中蛋白质分子间的水结合力, 并缓冲细胞质过度脱水, 从而增强草坪草的抗寒性<sup>[29]</sup>。本研究中, 80% 和 70% FC 灌水下限处理 SOD、POD 和 CAT 活性始终保持最高, 增强了高羊茅本身清除活性氧和自由基的能力, 为延长高羊茅绿期提供了保障。此外, 80% FC 和 70% FC 灌水下限处理均能显著降低高羊茅相对电导率及 MDA 的积累, 提高体内游离脯氨酸和可溶性糖的含量, 显著减轻低温造成的伤害, 提高了高羊茅抗寒性, 对延长高羊茅冬季绿期起到了直接作用。试验中处理  $W_4$  的游离脯氨酸和可溶

性糖含量一直保持较高水平, 可能与前期低灌水下限造成的轻微伤害有关, 有待进一步研究。综合考虑节水和提高水分利用效率等多种因素, 70% FC 灌水处理为高羊茅秋末冬初季节最佳的灌水下限。

### 参考文献

- [1] Morris KN. Grasses for overseeding bermudagrass fairways. *Golf Course Management*, 2004, **72**: 89-94
- [2] Luo T-Q (罗天琼), Mo Z-P (莫志萍), Mo B-T (莫本田), et al. Effect of different growth regulators on the lawn quality. *Pratacultural Science* (草业科学), 2011, **28**(5): 710-716 (in Chinese)
- [3] Liang G-J (梁广坚), Yang J-L (杨健玲), Huang M (黄敏), et al. Effects of "leaf-growing-reagent for warm-season turf" on antifreeze protein of *Zoysia tenuifolia*. *Pratacultural Science* (草业科学), 2007, **24**(3): 106-109 (in Chinese)
- [4] Guo H-L (郭海林), Gao Y-D (高雅丹), Xue D-D (薛丹丹), et al. Genetic analysis of cold tolerance of zoysia grass. *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), 2009, **18**(3): 53-58 (in Chinese)
- [5] Du Y-J (杜永吉), Yu L (于磊), Sun J-X (孙吉雄), et al. Comprehensive assessment of cold resistance of three *Zoysia japonica* varieties. *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), 2008, **17**(3): 6-16 (in Chinese)
- [6] James W. The heat is on! Keeping winter pitches playable. *Turfgrass Bulletin*, 2000, **210**: 5-7
- [7] Goatey JM, Maddox VL, Lang DL, et al. Temporary covers maintain fall bermudagrass quality, enhance spring green up, and increase stem carbohydrate levels. *Hortscience*, 2005, **40**: 227-231
- [8] Song X-F (宋雪枫), Su D-R (苏德荣), Zhuang Q-Y (庄千燕), et al. Effect of plastic film mulching on prolonging turf green period in winter. *Acta Agrestia Sinica* (草地学报), 2010, **18**(3): 441-446 (in Chinese)
- [9] Jordan JE, White RH, Vietor DM, et al. Effect of irrigation frequency on turf quality, shoot density, and root length density of five bentgrass cultivars. *Crop Science*, 2003, **43**: 282-287
- [10] Liu L-F (刘丽芳), Huang G-H (黄冠华), He J-P (何建平), et al. Simulation of irrigation requirements of typical cool season turfgrass in Beijing area. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2009, **25**(1): 64-68 (in Chinese)
- [11] Zheng Y-H (郑玉红), Cai Q-S (蔡庆生), Liu J-X (刘建秀). Response of centipedegrass (*Eremochloa ophiuroides* (Munro.) Hack.) accessions to water stress. *Acta Agrestia Sinica* (草地学报), 2005, **13**(2): 102-105 (in Chinese)
- [12] Qi W (齐伟), Zhang J-W (张吉旺), Wang K-J (王空军), et al. Effects of drought stress on the grain yield and root physiological traits of maize varieties with

- different drought tolerance. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(1): 48–52 (in Chinese)
- [13] Jia W-Q (贾蕴琪). Study on Turf Green Period and Freezing Tolerance of *Zoysia japonica*. Master Thesis. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2009 (in Chinese)
- [14] Li H-S (李合生), Sun Q (孙 群), Zhao S-J (赵世杰), *et al.* Principles and Techniques of Plant Physiological Biochemical Experiment. Beijing: Higher Education Press, 2000 (in Chinese)
- [15] Zhao S-J (赵世杰), Shi G-A (史国安), Dong X-C (董新纯). The Guide of Plant Physiological Experiment. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2002 (in Chinese)
- [16] Kong L-J (孔兰静), Li H-S (李红双), Zhang Z-G (张志国). Physiological response to soil drought stress in three ornamental grasses. *Chinese Journal of Grassland* (中国草地学报), 2008, **30**(4): 40–44 (in Chinese)
- [17] Zhang H-Q (张海清), Zou Y-B (邹应斌), Xiao G-C (肖国超), *et al.* Effect and mechanism of cold tolerant seed-coating agents on the cold tolerance of early indica rice seedlings. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2006, **39**(11): 2220–2227 (in Chinese)
- [18] Yamaki S, Uritani I. The mechanism of chilling injury in sweet potatoes. Part V. Biochemical mechanism of chilling injury with special reference to mitochondrial lipid components. *Agricultural and Biological Chemistry*, 1972, **36**: 47–55
- [19] Pan R-C (潘瑞炽), Wang X-J (王小菁), Li N-H (李娘辉). Plant Physiology. 6th Ed. Beijing: High Education Press, 2008 (in Chinese)
- [20] He R-W (何若韪). Low Temperature Stress Physiology of Plant. Beijing: Chinese Agriculture Press, 1995 (in Chinese)
- [21] Yuan X-J (袁学军), Liu J-X (刘建秀). Effect of  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$  on chilling resistance of *Eremochloa ophiuroides*. *Pratacultural Science* (草业科学), 2007, **24**(11): 82–85 (in Chinese)
- [22] Lin H-X (林海馨). Plant Cold Damage and Cell Physiology. Xiamen: Xiamen University Press, 1994 (in Chinese)
- [23] Feng N-J (冯乃杰), Zu W (祖 伟), Sun C-S (孙聪姝), *et al.* Mechanism of chemical control seed coating agent enhancing cold resistance of soybean seeding. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2008, **41**(12): 4281–4286 (in Chinese)
- [24] Lagriffoul A, Mocquot B, Mench M, *et al.* Cadmium toxicity effects on growth, mineral and chlorophyll contents, and activities of stress related enzymes in young maize plant (*Zea mays* L.). *Plant and Soil*, 1998, **200**: 241–250
- [25] Zhuge Y-P (诸葛玉平), Zhang Y-L (张玉龙), Zhang X-D (张旭东), *et al.* Effects of lower limit of subsurface drip irrigation on tomato growth and its yield in plastic tunnel. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(5): 767–771 (in Chinese)
- [26] Penuelas J, Filella I. Visible and near infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. *Trends in Plant Science*, 1998, **3**: 151–156
- [27] Okawara R, Kaneko S. Changes in photosynthetic oxygen evolution and chlorophyll fluorescence in some cool season grasses and zoysiagrasses (*Zoysia* spp.) from autumn to winter. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1995, **41**: 801–806
- [28] Pei Y (裴 芸), Bie Z-L (别之龙). Effects of different irrigation maxima on the growth, quality and physiological characteristics of lettuce in plastic greenhouse. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2007, **23**(9): 176–180 (in Chinese)
- [29] Yan M-L (严美玲), Jiao Y-L (矫岩林), Li X-D (李向东), *et al.* Effects of irrigation amount at seedling stage on physiological characteristics and yield of peanut. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(2): 347–351 (in Chinese)

---

作者简介 刘立军,男,1984年生,硕士研究生.主要从事草坪草抗逆性研究. E-mail: liulj2014@Yahoo.cn

责任编辑 李凤琴

---