

浑善达克沙地 C_3 和 C_4 植物对干旱胁迫响应策略

刘美珍¹, 张海敏², 杨珊^{1,3}, 杜建材⁴, 郭翠艳⁵, 蒋高明¹

1. 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093
2. 内蒙古和信园蒙草抗旱绿化有限公司, 呼和浩特 010030
3. 中国科学院研究生院, 北京 100049
4. 中国农业科学院草原研究所, 呼和浩特 010030
5. 北京工业大学激光学院, 北京 100022

摘要 选取浑善达克沙地 C_3 植物羊草 (*Leymus chinensis*) 和 C_4 植物虎尾草 (*Chloris virgata*) 为研究对象, 进行 2 种干旱胁迫处理, 处理 1 将植物浇至饱和含水量后, 使其自然干旱 10d, 之后复水至饱和含水量; 处理 2 是在处理 1 的基础上, 每天晚上让植物接受自然的大气凝结水。处理期间测定植物的叶片水势、比叶面积、气孔密度、氮含量及生物量等生理生态指标, 探讨干旱胁迫及复水后不同光合功能型植物对干旱胁迫响应策略。研究表明, (1) 干旱胁迫显著降低了虎尾草的叶片水势, 大气凝结水没有显著改变其叶片凌晨水势, 干旱胁迫第 10 天时羊草叶片凌晨水势值显著降低, 大气凝结水使羊草叶片的水势值保持在正常范围之内; (2) 不同干旱胁迫下, 植物比叶面积和气孔密度与处理前相比呈下降趋势, 但在复水后恢复到处理前水平; (3) 干旱胁迫显著提高了羊草叶片的氮含量, 而虎尾草叶片氮水平变化不显著; (4) 干旱胁迫显著提高了羊草的根冠比, 而虎尾草的根冠比影响不大, 但干旱胁迫则显著提高了虎尾草的果重比。羊草在干旱胁迫下分配较多的生物量到根系, 有利于水分的吸收, 从而提高了其抗旱性, 而虎尾草则分配较多的生物量到种子, 使其不断扩大繁殖群体。

关键词 羊草; 虎尾草; 干旱胁迫; 水分生理; 生物量分配

中图分类号 S761.1

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.25.007

Response Strategies of C_3 and C_4 Plants to Drought Stress in Hunshandake Sandland

LIU Meizhen¹, ZHANG Haimin², YANG Shan^{1,3}, DU Jiancai⁴, GUO Cuiyan⁵, JIANG Gaoming¹

1. State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China
2. Inner Mongolia Hexinyuan Grass Drought Resisting and Greening Limited Company, Huhhot 010030, China
3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
4. Institute of Grassland, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Huhhot 010030, China
5. College of Laser, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China

Abstract It is widely reported that global climate change has affected on the growth and distribution of plants. In order to investigate the response of different photosynthetic functional plants to drought stress, C_3 plants (*Leymus chinensis*) and C_4 plants (*Chloris virgata*) are chosen from Hunshandake Sandland to experience drought stresses treatments. One treatment was that the plants were drought naturally for 10 days after a saturant watering; the second treatment was that the plants were drought naturally for 10 days with accepting dew at each night after a saturant watering. Then the hydrological characteristics i.e. leaf water potential at dawn, the specific leaf area, stoma density, nitrogen content, and biomass were compared. And then different strategies in response to drought stresses were discussed. Drought stresses significantly decrease the leaf water potential at dawn (ψ_{dawn}) of *Chloris virgata*, while dew does not affect on the value of

收稿日期: 2011-08-11; 修回日期: 2011-08-22

基金项目: 中国科学院植被与环境变化国家重点实验室青年人才项目; 教育部留学回国人员科研启动基金项目

作者简介: 刘美珍, 副研究员, 研究方向为植物生理生态, 电子信箱: liumzh@ibcas.ac.cn

ψ_{dawn} of *Chloris virgata*. Drought stresses significantly lower ψ_{dawn} of *Leymus chinensis* at the tenth day after the drought period. Dew significantly affects the ψ_{dawn} of *Leymus chinensis*. Drought stresses significantly reduce Specific Leaf Area (SLA) and stomatal density; however, both of them are recovered to the normal level after re-watering. Nitrogen concentrations of *Leymus chinensis* are significantly increased under drought stresses; meanwhile there are no significant changes for *Chloris virgata*. Ratio of root and crown is improved for *Leymus chinensis* under drought stresses, and there is no differences for *Chloris virgata*. But the drought significantly improves the ratio of fruits and crown for *Chloris virgata*. The result indicates that more biomass is allocated into the roots for *Leymus chinensis* under drought stresses. This pattern is benefit for water absorption and improves resistance to the drought. By contrary, more biomass is input to produce seeds for *Chloris virgata*, which is helpful to expand its population. The results indicate that different strategies for two species are applied in response to the drought stresses, and C_3 species *L. chinensis* displays the higher ability to resist drought than that of C_4 species *C. virgata*.

Keywords *Leymus chinensis*; *Chloris virgata*; drought stress; hydrological characteristics; biomass allocation

0 引言

干旱是指在相对广阔的地区,长期无降水或降水异常偏少的气候背景下,水分供求严重不足的一种现象,它是一种复杂的自然灾害,会在大范围内造成严重的环境、社会和经济后果,是难于监测的自然现象^[1-3]。自 20 世纪 70 年代末期以来,中国北方地区持续的气候干旱和生态环境恶化,既是全球增温过程对中国区域生存环境综合影响的结果,又是该区域不合理人类活动短期和长期效应综合累积的结果。它影响着区域自然生态系统的结构和功能,改变着区域粮食生产、水资源供需和土地资源利用格局,是中国目前面临的严重生存环境问题之一^[4]。浑善达克沙地位于内蒙古高原中部,属于半干旱大陆性季风气候区,年降水量为 200—350mm,并且降水的年际变率较大,季节分布极不均匀。春季雨量仅占 10%左右,而 50%以上的降水量集中在 7、8 月,阶段性干旱成为制约该地区经济发展的主要因素之一^[5-6]。一些研究进一步表明,浑善达克沙地各年代四季降水和年降水量均呈现波动式的变化,20 世纪 60 年代降水较多,从 70 年代到 80 年代降水明显减少,进入 90 年代后,降水总量有所增加,但多为暴雨到特大暴雨。而从 2000 年以后,季节和年降水量均明显减少,并降到 40 年以来的低值,降水总量的锐减以及降水变率增大,使水分的利用效率降低,水资源亏缺现象严重,进一步增大了干旱发生的几率,导致沙漠化的扩展和荒漠化土地面积的增加^[7-8]。因此,对于浑善达克沙地这样一个生态环境脆弱及敏感地带,每年降水量的多少,直接影响该地区生态环境的恢复与沙漠化的扩展。

羊草(*Leymus chinensis*)为广旱生根茎禾草,广泛分布于开阔平原、起伏的低山丘陵,以及河滩和盐渍低地,生长在黑钙土、碱化草甸上、甚至柱状碱土上。在年降水量 250mm 的地区生长良好,在湿润年份,茎叶茂盛常不抽穗;干旱年份,草高叶茂,能抽穗结实。在呼伦贝尔和锡林郭勒的森林草原地带以及相邻的干草原外围地区形成面积相当辽阔的羊草草原群系,成为该地带最发达的草原类型之一。此外,羊草所含营养物质丰富且产量高,为内蒙古草原主要牧草资源,亦为

秋季收割干草的重要饲草。在中国东北、内蒙古地区,羊草还是人工草地建植中首选的材料,被广泛应用。

虎尾草(*Chloris virgata*)是禾本科虎尾草属一年生草本植物,几乎遍布全国,北方居多,为家畜优质食草,但也是北方常见的农田杂草之一。适应性极强,能在恶劣的盐碱化土壤生长,其种子产量高,夏季多雨时期可以迅速萌发,形成单优势种的虎尾草群落;该草根系发达,植株茂密,既能积结泥沙又能自然积累有机质,改善盐碱土的理化性质,使植被自然恢复,是改良碱化撂荒地和碱化草原的先锋植物,在沙生、湿生、撂荒地、盐生系列演替中占有重要地位^[9]。

本试验以采自浑善达克沙地的成熟羊草和虎尾草种子播种获得的植物为材料,研究干旱胁迫对羊草和虎尾草某些生理生态特性指标的变化,力求探讨植物的抗旱机制,以筛选出优良的抗旱种质资源,为未来气候干旱化增强的浑善达克沙地生态恢复与健康发展提供理论依据,具有很大的现实意义。

1 材料与方法

1.1 植物材料

试验所用植物材料由采自浑善达克沙地的成熟羊草和虎尾草种子播种获得。于 2010 年 5 月初将种子进行消毒,在培养基上发芽,于 5 月 15 日移栽至温室中的白色塑料花盆(口径×高为 21cm×21cm),花盆中,园土:有机质:蛭石=5:4:1。每盆种植一株植物,浇以充足的水分。为了保证植物种的遗传特性的一致性,所有种子来自相同植株的种子。

1.2 实验处理

待移栽苗长至 6 周左右,开始设置 2 种处理和 1 个对照。处理 1,在将植物浇至 100%田间持水量后,使其自然干旱 10d。在处理前,处理第 5、7、10 天分别取样测定相关指标,在第 11 天时,又浇以充足水分至田间持水量,复水 1 周后再进行 1 次取样。处理 2 与处理 1 相同,唯一不同之处在于每天晚上处理 2 的植物叶片接受自然的凝结水。对照为以每 2 天补足土壤水分至田间持水量的植物。每种处理 6 个重复,共 36

个盆栽苗。

1.3 测定方法

1.3.1 水势测定

用 WP4 水势仪 (Decagon Inc. Washington, USA) 测定植物叶片凌晨水势和正午水势。每个测定日早晨 5:00—5:30 太阳升起之前取样,用冰壶带回实验室,用 PMS Model 600 型压力室 (Decagon Inc. Washington, USA) 测定凌晨水势值,然后将叶片包在锡箔纸里在液氮里冷冻 10min,取出后在 WP4 里测渗透势。中午 12:00—13:00 取样测定叶片正午水势,用冰壶带回实验室,用压力室测定正午水势值,然后将叶片包在锡箔纸里在液氮里冷冻 10min,取出后在 WP4 里测渗透势。每个处理的每个重复取 3 片叶子。

1.3.2 比叶面积测定

比叶面积 (Specific Leaf Area, SLA) 是用叶面积除以叶片干重计算得到的数据,是表面叶片厚度的指标。在测定日早晨取样,将所取样分别装入已做好不同处理标签的塑料袋里,立即带回实验室。叶片的长、宽和面积采用 LI-3000C 叶面积分析仪 (LI-COR Inc. Lincoln, USA) 测定。测试完毕,将叶片置于 80℃ 烘箱里烘干 24h,称干重并计算 SLA,重复 6 次。比叶面积=叶片面积/叶片干重。

1.3.3 气孔密度测定

气孔密度在扫描电镜下观察。每个测定日取叶片中间不带叶脉的部分,面积约为 6—9mm²,每个草种处理重复 3 次。剪切的叶片经 FAA (酒精:冰醋酸:甲醛=18:1:1) 固定液固定,脱水 (一系列浓度逐渐增加的酒精溶液) 并进行醋酸异戊酯置换及日立牌 CSP-Z 型干燥仪 (Hitachi Inc. Tokyo, Japan) 进行 CO₂ 临界点干燥,在日立牌 LB-5 型离子镀金仪 (Hitachi Inc. Tokyo, Japan) 进行镀金,最后在日立牌 S-570 型 (Hitachi Inc. Tokyo, Japan) 扫描电镜下 (执行电压为 12kV) 观察气孔并进行拍照。根据扫描电镜下拍的照片,统计并记录叶片上、下表面气孔数量及开张大小 (扫描电镜)。每个草种的不同处理统计叶片上、下表皮气孔长度、宽度和密度,重复 6 次。

1.3.4 叶片氮含量测定

植物叶片氮含量 (单位叶面积的氮含量) 和叶片氮浓度 (单位重量叶片氮含量) 测定。定氮过程包括待测样品的消化、蒸馏和滴定。用 FA1004 分析天平 (0.0001g, 天津福元铭仪器设备有限公司) 称磨细烘干的植物样品 0.1000g 左右,置于大消化管中消煮,消煮充分后冷却,便可在全自动的凯氏定氮仪上进行测氮了。应同时做空白试验 (不加样品,其他相同) 以校正试剂误差。氮含量计算公式为

$$X=0.014(V_1-V_2)N/m$$

式中 X 为样品中氮的百分含量, g/kg; V_1 为样品消耗硫酸标准液的体积, mL; V_2 为试剂空白消耗硫酸标准溶液的体积, mL; N 为硫酸标准溶液的当量浓度; 0.014 为 1N 硫酸标准溶液 1mL 相当于氮克数; m 为样品的质量, g。根据比叶面积换算植物单位叶面积的氮含量 (g/m²)。重复 6 次。

1.3.5 植物生物量及各指标的计算

地上部分生物量用收获法测定^[10],即在测定时把地上部分分齐地刈割,然后迅速将地上部分生物量用信封装好后带回实验室。先称其鲜质量,然后把样品放入 65℃ 的烘箱中烘干至恒量后称其干质量。所有样品采用电子天平 (感量为 0.01g) 称量。地下部分生物量用挖土法测定,即在地上部分生物量测定完的花盆中将土壤全部取出,用流水冲洗直至把泥土全部冲洗干净,再把样品放入 65℃ 烘箱中烘干至恒量后称其干质量。重复 6 次。各指标计算:根冠比=根重/地上生物总重;叶重比=叶重/植物总重;根重比=根重/植物总重;种子重比=种子重/植物总重。

1.4 统计分析

用 Excel 整理数据。数据分析使用 SPSS 16.0 软件,2 个植物种差异显著性检验采用 t 检验,进行 ANOVA 方差分析,多重比较用 LSD。采用 SigmaPlot 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同干旱胁迫及复水对羊草和虎尾草水势的影响

随着干旱胁迫时间延长,羊草和虎尾草的凌晨水势值呈现不同的变化。羊草有着先上升后下降的趋势;而虎尾草凌晨水势值逐渐下降在复水后接近对照水平 (图 1(a), 图 1(b))。羊草和虎尾草的叶片水势差亦呈现不同的变化 (图 1(c), 图 1(d))。

羊草的处理 1 和处理 2 的水势差极显著变化 ($P<0.001$)。与处理前相比,处理 1 的凌晨水势在干旱胁迫第 10 天显著下降,凌晨水势值为 -2.1MPa。复水后凌晨水势值显著上升。复水后水势有所增加,但与对照的差异不显著。处理 1 的水势差第 10 天极显著下降 ($P<0.001$)。处理 2 的水势差第 7 天显著上升 ($P<0.05$),而干旱胁迫的第 10 天水势差极显著下降 ($P<0.001$)。干旱胁迫显著降低了虎尾草的凌晨叶片水势 ($P<0.01$),但处理 1 和处理 2 之间的水势差异不显著。复水后叶片凌晨水势上升至对照水平。处理 1 和处理 2 的水势差变化显著 ($P<0.01$),处理的前 7 天水势差呈下降趋势,但处理第 10 天,2 个处理的水势差有显著增加的趋势 ($P<0.001$),复水后又回到对照水平。

2.2 不同干旱胁迫及复水对羊草和虎尾草比叶面积的影响

羊草仅有处理 2 呈显著变化 ($P<0.05$)。第 7 天与处理前相比,显著下降,为处理前的 76%,而第 10 天显著上升达到对照水平,复水后反而呈下降变化 (图 2(a))。虎尾草在干旱胁迫下无显著变化,但在复水后,比叶面积值高于对照处理 (图 2(b))。

2.3 不同干旱胁迫及复水对羊草和虎尾草气孔密度的影响

干旱胁迫下显著降低了羊草的气孔密度 ($P<0.01$),但上下表皮气孔密度差异不显著 ($P<0.001$) (图 3(a))。干旱胁迫显著降低了虎尾草下表皮的气孔密度 ($P<0.01$),但对上表皮的气孔密度影响不显著 (图 3(b))。两种不同处理之间的差异不显著。

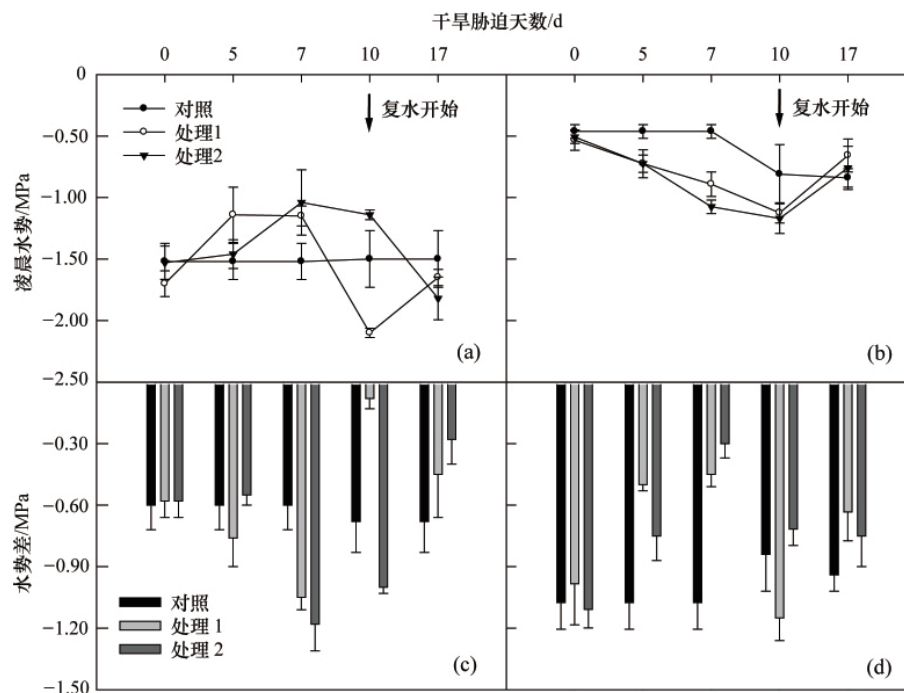


图1 不同干旱胁迫及复水后羊草叶片凌晨水势(a),虎尾草叶片凌晨水势(b),羊草叶片水势差(正午水势与凌晨水势之差)(c),虎尾草叶片水势差(d)的变化

Fig. 1 Changes of the leaf dawn water potential in the *Leymus chinensis* (a), *Chloris virgata* (b) and the water potential difference (the difference of leaf water potential at noon and leaf water potential at dawn) in the *Leymus chinensis* (c), *Chloris virgata* (d) in response to different drought stress and re-watering

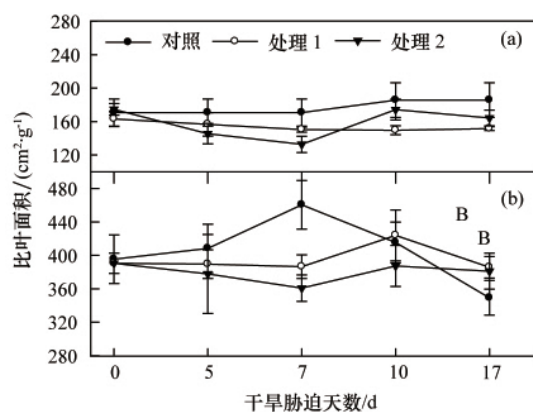


图2 不同干旱胁迫对羊草叶片比叶面积(a)和虎尾草叶片比叶面积(b)的影响

Fig. 2 Changes of the specific leaf area in the *Leymus chinensis* (a) and *Chloris virgata* (b) in response to different drought stress and re-watering

2.4 不同干旱胁迫及复水对羊草和虎尾草叶片氮含量的影响

在不同干旱胁迫下显著增加了羊草的叶片氮含量 ($P < 0.01$) (图 4(a)), 而对虎尾草的氮含量影响不显著 (图 4(b)), 不同处理之间对叶片氮含量的影响不显著。处理 1 和处理 2 分别比对照氮含量增加了 57.14% 和 48.57%。就单位重量的叶片氮含量而言, 虎尾草的氮浓度呈显著下降变化, 处理 1

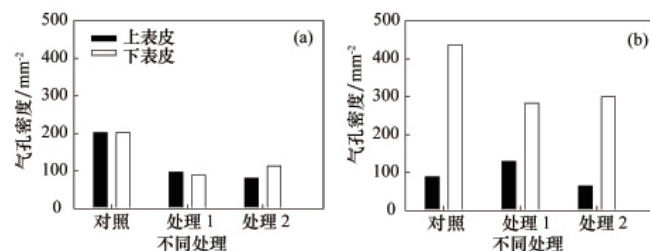


图3 不同干旱胁迫对羊草上下表皮气孔密度(a)和虎尾草上下表皮气孔密度(b)的影响

Fig. 3 Changes of the stomatal density in the *Leymus chinensis* (a) and *Chloris virgata* (b) in response to different drought stress and re-watering

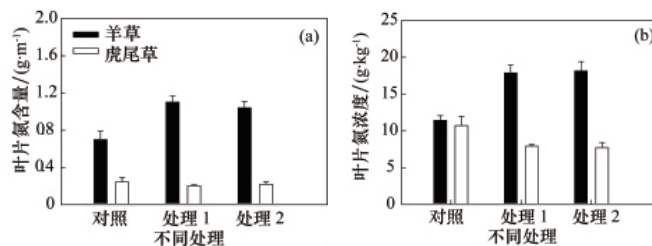


图4 不同干旱胁迫处理对羊草和虎尾草叶片氮含量(单位叶面积的氮含量)(a)和叶片氮浓度(单位重量叶片氮含量)(b)的影响

Fig. 4 Changes of the leaf nitrogen content (a) and nitrogen concentration (b) in the *Leymus chinensis* and *Chloris virgata* in response to different drought stress and re-watering

和处理 2 分别下降到对照的 73.79%和 72.11%。然而羊草的氮浓度呈极显著上升变化,处理 1 和处理 2 分别比对照氮的浓度增加了 56.29%和 58.57%。

2.5 不同干旱胁迫及复水对羊草和虎尾草生物量的影响

在不同的干旱胁迫下,羊草和虎尾草的生物量有着不同的变化(图 5)。干旱胁迫显著增加了羊草的根冠比,而对虎尾

草的影响不显著。羊草的叶重比和根重比显著高于虎尾草 ($P<0.001$), 干旱胁迫对羊草的叶重比和根重比的影响不显著。干旱胁迫下对虎尾草的根重比影响不显著,但叶重比差异极显著,处理 2 与对照相比,极显著上升 ($P<0.01$),为对照的 2 倍。果重比差异显著 ($P<0.05$),处理 1 和处理 2 与对照都呈显著上升趋势 ($P<0.05$)。

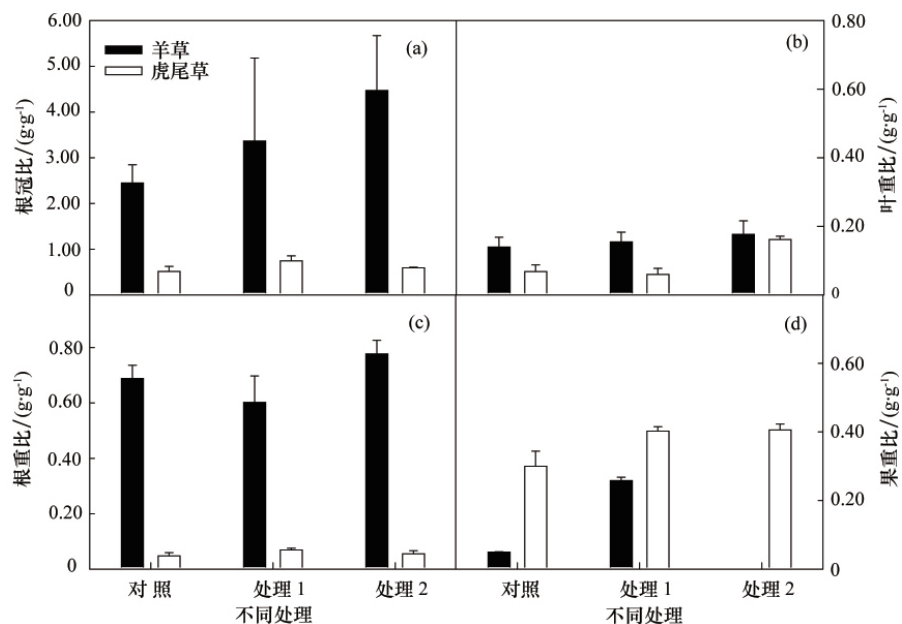


图 5 不同干旱胁迫对羊草和虎尾草根冠比(a)、叶重比(b)、根重比(c)和果重比(d)的影响

Fig. 5 Changes of the root shoot ratio (a) in the *Leymus chinensis* and *Chloris virgata*, the leaf weight ratio in the *Leymus chinensis* and *Chloris virgata* (b), the root weight ratio in the *Leymus chinensis* and *Chloris virgata* (c), the seed weight ratio in the *Leymus chinensis* and *Chloris virgata* (d), in response to different drought stress and re-watering

3 讨论

本试验结合形态学、生理生态学及生产量综合指标对植物的抗旱性进行评价。从不同的指标来看,不同的干旱胁迫及复水使羊草和虎尾草发生了不同的变化,植物形成不同的生存策略。植物对干旱胁迫—复水这样的变水条件的响应方式是,在胁迫解除后存在快速生长,以部分弥补胁迫造成的损失,这是对环境变化的一种适应,适应的结果体现在植物高度、叶面积、生物量、恢复生长的速率等方面的变化上^[11-12]。本研究中,不同干旱胁迫下,植物比叶面积与处理前相比呈下降趋势,但在复水后恢复到处理前水平,这表明植物存在着胁迫解除后快速生长的特征。这一现象被认为是植物对水分不足的一种适应机制,即在有限的土壤水分条件下,通过减少总的蒸腾面积,尽可能减少水分的丢失来维持水分平衡^[13-14]。羊草生物量在干旱胁迫下降低,而虎尾草则相反,生物量与对照组比较,有增加的趋势,即处理组的产量比对照组的产量略有增加,这说明干旱处理对植株的生长有一定的影响,而且有可能增加植株的产量,该结果与适度水分亏缺不仅不会减产,反而对产量产生积极影响的结论相一致^[11]。

气孔在植物与环境的气体交换中,影响着蒸腾与光合的

过程,起着十分重要的作用。气孔的调节能力是植物适应干旱逆境的重要方式之一^[13,15]。本研究中,在不同强度的干旱胁迫下,羊草和虎尾草气孔密度都呈下降趋势,以适应干旱条件,进而影响植物光合作用。光合作用是植物生长发育的基础,光合作用原理对生产实践有巨大的指导作用。它直接关系到植物各器官的生物量分配,而最终影响产量。另外,干旱的环境条件对生物量及其向不同器官分配比例的变化也反映了其对生态环境的适应能力和不同策略^[16]。本研究中,羊草和虎尾草的根冠比在干旱胁迫下比值增大,说明分配了更多的同化物于根,有利于水分的吸收,从而提高了其抗旱性,与刘长利等^[16],Pallardy 等^[17]的结果是一致的。同时,虎尾草叶重比和果重比较羊草发生显著上升变化,这说明虎尾草对于干旱胁迫响应更强,适应力更强。

叶水势是表示植株体内水分状况的一个较精确的指标,可以在很大程度上反映植物的受旱状况^[18],一旦复水,叶片水分状况得到改善,而叶片又可在较长时间内保持较强的渗透调节能力,从而有利于叶片的生长、光合和蒸腾等生理过程^[18-19]。本研究中,羊草在干旱胁迫下变动较大,在最大干旱胁迫下急剧下降,复水后上升但未达到对照水平,这可能是因为复水

时间还不足。虎尾草在干旱胁迫下一直以低于对照水平的水势值下降,复水后达到甚至超过对照值。

4 结论

羊草和虎尾草呈现出不同的对干旱响应的策略,虎尾草在干旱胁迫下,分配较多的生物量到种子,而羊草则储藏较多的生物量到根系,为第2年植物萌发提供充足的营养物质。

致谢 感谢中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室付增娟老师为实验提供的帮助,感谢尹晓洁博士对实验测定的帮助。

参考文献 (References)

- [1] 李新周, 刘晓东, 马柱国. 近百年来全球主要干旱区的干旱化特征分析[J]. 干旱区研究, 2004, 21(2): 97-103.
Li Xinzhou, Liu Xiaodong, Ma Zhuguo. *Arid Zone Research*, 2004, 21(2): 97-103.
- [2] 王宏, 李晓兵, 李霞, 等. 中国北方草原对气候干旱的响应 [J]. 生态学报, 2008, 28(1): 172-182.
Wang Hong, Li Xiaobing, Li Xia, et al. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(1): 172-182.
- [3] 符淙斌, 安芷生, 郭维栋. 中国生存环境演变和北方干旱化趋势预测研究(I): 主要研究成果[J]. 地球科学进展, 2005, 20(11): 1157-1167.
Fu Zongbin, An Zhisheng, Guo Weidong. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(11): 1157-1167.
- [4] 赵媛媛, 何春阳, 李晓兵, 等. 干旱化与土地利用变化对中国北方草地与农牧交错带耕地自然生产潜力的综合影响评价 [J]. 自然资源学报, 2009, 24(1): 125-137.
Zhao Yuanyuan, He Chunyang, Li Xiaobing, et al. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(1): 125-137.
- [5] 王涛. 我国沙漠化研究的若干问题——2. 沙漠化研究内容[J]. 中国沙漠, 2003, 23(5): 1-6.
Wang Tao. *Journal of Desert Research*, 2003, 23(5): 1-6.
- [6] 李香云, 王立新, 章予舒. 近40年我国西北荒漠化区降和气温的时空变异特征——以塔里木河流域为例 [J]. 气候与环境研究, 2004, 9(4): 658-670.
Li Xiangyun, Wang Lixin, Zhang Yushu. *Climatic and Environmental Research*, 2004, 9(4): 658-670.
- [7] 白美兰, 沈建国, 裴浩. 气候变化对沙漠化影响的评估[J]. 气候与环境研究, 2002, 7(4): 457-464.
Bai Meilan, Shen Jianguo, Pei Hao. *Climatic and Environmental Research*, 2002, 7(4): 457-464.
- [8] 白美兰, 郝润全, 邸瑞琦等. 气候变化对浑善达克沙地沙漠化影响的评估[J]. 气候与环境研究, 2006, 11(2): 215-220.
Bai Meilan, Hao Runquan, Di Ruiqi, et al. *Climatic and Environmental Research*, 2006, 11(2): 215-220.
- [9] 梁涵, 张欣欣. 盐胁迫下虎尾草上调基因的筛选和鉴定 [J]. 分子植物育种, 2008, 6(5): 886-892.
Liang Han, Zhang Xinxin. *Molecular Plant Breeding*, 2008, 6(5): 886-892.
- [10] 平晓燕, 贾丙瑞, 袁文平, 等. 羊草种群生物量分配动态模拟[J]. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2699-2704.
Ping Xiaoyan, Jia Bingrui, Yuan Wenping, et al. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(12): 2699-2704.
- [11] 张恒月, 郭屹立, 王磊, 等. 干旱和复水对大豆叶片光合生理特性及产量的影响[J]. 河南大学学报: 自然科学版, 2009, 39(2): 183-188.
Zhang Hengyue, Guo Yili, Wang Lei, et al. *Journal of Henan University: Natural Science Edition*, 2009, 39(2): 183-188.
- [12] Shan L, Zhang S Q. Water saving agriculture and its biological basis[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 1999, 6(1): 2-6.
- [13] 龚吉蕊, 黄永梅, 葛之藏, 等. 4种杂交杨对土壤水分变化的生态学响应[J]. 植物生态学报, 2009, 33(2): 387-396.
Gong Jirui, Huang Yongmei, Ge Zhiwei, et al. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(2): 387-396.
- [14] Ruiz-Sánchez M C, Domingo R, Torrecillas A, et al. Water stress preconditioning to improve drought resistance in young apricot plants[J]. *Plant Science*, 2000, 156(2): 245-251.
- [15] Cowan I K. Stomatal physiology and gas exchange in the field[M]//Steffen W L, ed. Flow and Transport in the Natural Environment: Advances and Applications. Berlin: Springer-Verlag, 1982: 160-172.
- [16] 刘长利, 王文全, 崔俊茹, 等. 干旱胁迫对甘草光合特性与生物量分配的影响[J]. 中国沙漠, 2006, 24(1), 142-145.
Liu Changli, Wang Wenquan, Cui Junru, et al. *Journal of Desert Research*, 2006, 24(1): 142-145.
- [17] Pallardy S G, Rhoads J L. Morphological adaptations to drought in seedling of deciduous angiosperms [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1993, 23(9): 1766-1774.
- [18] 程林海, 张原振, 阎继耀. 干旱和复水对棉花叶片几种生理指标的影响[J]. 华北农学报, 1995, 10(4): 82-85.
Cheng Linhai, Zhang Yuanzhen, Yan Jiyao. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 1995, 10(4): 82-85.
- [19] Su P, Shan L. Compensatory effects of water recovery during jointing stage on maize treated by water stress at seedling period [J]. *Plant Physiology Communications*, 1995, 31(5): 341-344.

(责任编辑 岳臣)

《科技导报》“科技要闻”栏目征稿

“科技要闻”栏目主要选登各类媒体报道的自然科学领域近期的重要科技研究成果新闻。欢迎各研究课题组和科技工作者个人推荐或自荐新闻, 每条新闻约300字。栏目责任编辑: 杨书卷, 投稿邮箱: yangshujuan@cast.org.cn。