

DOI: 10.5846/stxb201408181636

杨帆, 安丰华, 杨洪涛, 王志春. 松嫩平原苏打盐渍土区不同潜水埋深下羊草的光合特征. 生态学报, 2016, 36(6): - .

Yang F, An F H, Yang H T, Wang Z C. Characteristics of leaf photosynthesis in *Leymus chinensis* grown in the saline-sodic soil area of the Songnen Plain, at different groundwater depths. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(6): - .

松嫩平原苏打盐渍土区不同潜水埋深下羊草的光合特征

杨 帆, 安丰华, 杨洪涛, 王志春*

中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102

摘要:通过人工控制地下水位模拟试验,研究了不同潜水埋深下羊草净光合速率和蒸腾速率。结果表明地下潜水埋深直接影响羊草的正常生理活动。潜水埋深在 1.0—2.5m 之间,潜水埋深越浅,羊草表现为净光合速率和蒸腾速率越高;随着潜水埋深的增加,羊草净光合速率和蒸腾速率减小,生理活动下降。不同月份羊草净光合速率和蒸腾速率与潜水埋深呈幂函数关系,不同时间羊草净光合速率和蒸腾速率与潜水埋深呈幂函数、指数函数和对数函数关系,相关系数均在 0.90 以上,因此可以用函数方程来估算不同潜水埋深下的羊草净光合速率和蒸腾速率。结果为松嫩平原苏打盐渍土区植被恢复与环境保护提供科学依据。

关键词:羊草;净光合速率;蒸腾速率;潜水埋深;盐碱土

Characteristics of leaf photosynthesis in *Leymus chinensis* grown in the saline-sodic soil area of the Songnen Plain, at different groundwater depths

YANG Fan, AN Fenghua, YANG Hongtao, WANG Zhichun*

Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China

Abstract: In this study, photosynthesis and transpiration rates of *Leymus chinensis* were studied under controlled groundwater depths, using lysimeters. The lysimeter was 120 cm in length, 120 cm in width, and 300 cm in height. A shallow-water lysimeter was used to maintain water table depths of 1.0, 1.4, 1.8, 2.2, and 2.5 m in five independent soil columns. The experiment was conducted at the Da'an Sodic Land Ecological Experiment Station of the Northeast Institute of Geography and Agroecology, at the Chinese Academy of Sciences. The soil type at the study site is classified as salt meadow soil. The experiment was conducted from June to September, in 2011 and 2012. The results indicate that variations in the net leaf photosynthesis and transpiration rates of *Leymus chinensis* showed a seasonal trend with a peak occurring in July or August. The diurnal change in the net photosynthetic and transpiration rates of *Leymus chinensis* was a typical bimodal curve with a depression that was observed at midday. Results also showed that groundwater depth has a strong impact on plant eco-physiological characteristics. When the groundwater depth ranged from 1.0 to 2.5 m, the net photosynthesis and transpiration rates of *Leymus chinensis* are highest when groundwater depth is 1.0 m, with a mean value of $22.6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-2}$ and $7.2 \text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectively. Both net photosynthesis and transpiration rates of *Leymus chinensis* decreased as the groundwater depth increased. Leaf photosynthesis and transpiration rates of *Leymus chinensis* were correlated with groundwater depth during the growing season months: June, July, August, and September. Logarithmic or exponential correlations existed between the leaf photosynthesis and transpiration rates of *Leymus chinensis* and groundwater buried depth, at the

基金项目:中国科学院西部行动计划重大项目(KZCX3-XB3-16);国家重点基础研究发展计划(2015CB150802);国家自然科学基金项目(41071022)

收稿日期:2014-08-18; **网络出版日期:**2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangzhichun@neigae.ac.cn

following times: 6:00 a.m., 8:00 a.m., 10:00 a.m., 12:00 a.m., 14:00 p.m., 16:00 p.m., and 18:00 p.m. Determination coefficients (R^2) for these correlation functions were >0.9 . These exponential or logarithmic correlations can be used to estimate the leaf photosynthesis and transpiration rates of *Leymus chinensis* in this area, when groundwater depth ranges from 1.0 m to 2.5 m. The results of this study provide useful information for the restoration of vegetation and the environmental protection of the Songnen Plain in China.

Key Words: *Leymus chinensis*; photosynthesis rate; transpiration rate; groundwater buried depth; saline-sodic soil

在地下水浅埋区,水位埋深决定植物能够获得的水分条件,而且对土壤含盐量具有重要的影响作用^[1-2]。许多研究都证实了影响天然植被生长和恢复的土壤水分和盐分与地下水埋深高低密切相关^[3-4]。由此不难看出,地下水位埋深对于干旱、半干旱区植被生长有极为重要的影响^[5-6]。羊草(*Leymus Chinense*)作为松嫩平原西部主要的植物群落,其对地下潜水位变化的生理生态响应机制意义重大。目前,有关羊草生理生态研究较多,羊草光合作用特征作为重要的指标被广泛关注,包括不同土壤类型的羊草光合特征^[7]、不同水分条件下的羊草光合特征和不同羊草种间的光合特征^[8],以及羊草光合特征与环境生态因子间的关系研究^[9-11]。松嫩平原盐渍化区地下水埋深在 2m 左右,属于典型的地下水浅埋区,地下水与植被间有着极为密切的水力联系,地下水是该区区域环境的敏感要素,是大多数植物生长的重要水源^[12]。研究发现,松嫩低平原区土壤盐渍化临界水位为 2.5m,当大于 2.5m 地下潜水与地表水力联系非常微弱^[13],因此低于 2.5m 的地下潜水位埋深作为地表植被生长的重要影响因素必然会影响羊草植物的生长发育过程,以往研究在该领域比较薄弱,不同潜水位埋深下羊草光合特征以及光合特征与潜水位埋深之间的关系研究仍未见报道。地下水浅埋区,潜水毛细上升作用可以直接补充土壤水分,进而影响植物的生理生态特征,明确潜水位埋深与植物光合特征之间的关系,可以为深入探讨地下水浅埋区生态水文机制研究提供基础数据。为此,本文通过人工控制潜水位来研究不同潜水位埋深下羊草的净光合速率和蒸腾速率,为松嫩平原西部地下水浅埋区植被恢复和环境保护提供理论依据。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

试验在中国科学院东北地理与农业生态研究所大安碱地生态试验站进行。地理坐标为东经 123°50′27″—123°51′31″,北纬 45°35′58″—45°36′28″。该区属中温带大陆季风气候,多年平均降水量 413.7mm,年均蒸发量为 1696.9mm。大安碱地生态试验站位于洮儿河流域下游低平原上。试验站周围地区属于嫩江古河道低漫滩,潜水埋深在 2m 左右,区内不同类型的盐渍化土壤镶嵌分布。其中在地形低平部位,盐渍化草甸土占很大部分^[14],该区主要植被类型为以羊草为主的草原草甸植被类型。因此本文选择长有羊草植物的盐化草甸土作为实验土壤具有代表性。

1.2 试验设计

试验设施为不同潜水位埋深的地中蒸渗仪,该设施由 5 个独立的装有土柱的钢筒与控制地下水位的马氏瓶组成。钢筒规格为 120cm×120cm×300cm。钢筒底部装有 18cm 厚的反滤层。土柱土壤是从姜家店羊草草场按 10cm 一层分层挖出,然后将所挖出的土壤按原来土壤剖面顺序依次回填至测筒内,每层填后踏实用水浸压。为防止降雨后产生地表径流,钢桶上端高出土柱表面 5cm。依据当地潜水位埋深状况,将地下水位埋深依次控制为 1.0m、1.4m、1.8m、2.2m 和 2.5m。土柱上羊草从采样点切块移栽。试验为 2 年数据,2011 年和 2012 年,每年的 6 月开始到 10 月结束。

1.3 测定方法

羊草净光合速率、蒸腾速率的测定采用 LI-6400 便携式光合测定仪,选择开放式测定系统测定。在每月的月初,选择晴朗天气测定羊草净光合和蒸腾速率的季节变化,同时在 8 月月初测定净光合速率和蒸腾速率

的日变化,测定时间为 6:00—18:00,每小时测定 1 次。测量时选择羊草株龄一致,叶片节位相似,叶龄相同,完全展开的功能叶片作为测定材料。测试时随机选取 5—6 株植株,测定由上至下第 1、2、3 片充分展开的完整叶片,每次测定叶片 15—18 片,取其平均值。

2 结果与分析

2.1 不同潜水埋深下羊草净光合速率和蒸腾速率季节变化

2.1.1 不同潜水埋深下羊草净光合速率季节变化

植物叶片的光合作用是植物生物产量形成的基础,光合速率的高低决定了光合能力的强弱,是植物产量高低的关键。测得的光合速率为净光合速率。

由图 1 可知,不同潜水埋深下两年羊草净光合速率季节变化趋势均符合单峰曲线,以生长最旺盛的 7 月或 8 月为峰值。且羊草净光合速率总体上随着潜水埋深的增加而降低。由图 1 可知,2011 年,6 月羊草净光合速率较低,在 $5.45\text{—}10.6\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ 之间,8 月羊草净光合速率最高,为 $14.3\text{—}24.0\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ 。2011 年五种潜水埋深下羊草净光合速率均表现为 1.0 m 和 1.4 m 大于其它 3 种潜水埋深。2012 年,6 月羊草净光合速率较低,8 月最高,两月五种处理之间羊草净光合速率均表现为 1.0 m 大于 1.4 m 大于其它 3 种潜水埋深。7 月羊草净光合速率表现为 1.0 m 潜水埋深大于其它四种潜水埋深。9 月羊草光合速率表现为潜水埋深 2.5 m 最小,其它四种差异不显著。2012 年与 2011 年比较,2012 年不同潜水埋深和不同月份的羊草净光合速率均大于 2011 年。

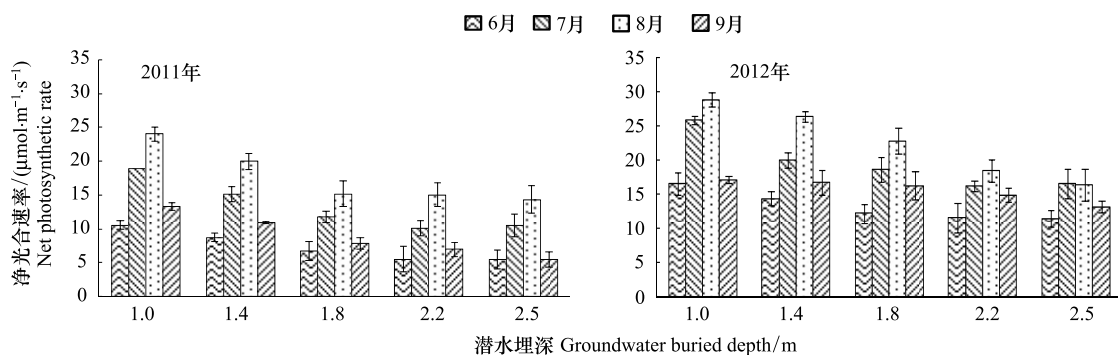


图 1 不同潜水埋深下不同月份羊草净光合速率

Fig. 1 Leaf net photosynthesis rate of *Leymus chinensis* in different month under different groundwater buried depth

2.1.2 不同潜水埋深下羊草蒸腾速率季节变化

蒸腾作用是植物重要的生理现象之一。蒸腾作用是体内水分和物质运输的主要动力,植物根系吸收的水分中 99% 以上消耗于蒸腾作用。植株体长大后,绝大部分的蒸腾是在叶片上进行的,而长大的叶片水分散失主要靠气孔蒸腾。

由图 2 可知,不同潜水埋深下两年羊草蒸腾速率季节变化趋势均符合单峰曲线,以生长最旺盛的 8 月为峰值。且羊草蒸腾速率总体上随着潜水埋深的增加而降低。2011 年 6 月不同潜水埋深下蒸腾速率 1.0 m 最大,其他四种无显著性差异;7 月份和 9 月份羊草蒸腾速率均表现为 1.0 m 潜水埋深蒸腾速率最大,其次为 1.4 m 潜水埋深,其他三种潜水埋深下差异不显著。8 月份不同潜水埋深下蒸腾速率表现为 1.0 m 大于 1.4 m 大于 1.8 m,其他两种潜水埋深下蒸腾速率差异不显著。2012 年 6 月份羊草蒸腾速率表现为 1.0 m 大于 1.4 m 大于 1.8 m 大于其他两种;7、8 月份羊草蒸腾速率均表现为 1.0 m 大于 1.4 m 大于其他三种潜水埋深;9 月份表现为 1.0 m 最大,其他无显著性差异。2012 年与 2011 年比较,2012 年不同潜水埋深和不同月份羊草蒸腾速率大于 2011 年。已有研究表明,羊草光合特征受外界自然因素影响较大,植物生长的土壤水分是重要的影响因子^[8,15-17]。土壤水分来源主要为降雨,在地下水浅埋区,由于潜水蒸发作用,也有部分潜水通过毛细上升作用补充到土壤中供植物生长。分析原因,2011 年降雨较少,6 月到 10 月间降雨量仅为 147 mm,且主要集中在

在7月下旬和8月初。其中7月中旬一场大雨为32 mm,8月初降雨为48 mm。因此,在2011年,除8月份以外,其他月份均比较干旱。由于降雨的减少,使土壤含水量降低,对于浅埋深的地下水1.0 m和1.4 m,地下水可以通过土壤的毛细上升作用将水分补充到植物根系分布的土壤区,使植物获得水分,在6月到10月间1.0 m和1.4 m潜水埋深下潜水毛细上升量分别为76.5 mm和48.4 mm。而对于潜水埋深在1.8 m以下的土柱,由于毛细上升能力的减弱,三种埋深毛细上升量在13.1—17.3 mm之间,使土壤根区获得较少的水分,甚至无法获得地下水的补给,土壤根区水分含量在10%以下,土壤极度干旱^[8],植物由于缺水而使其生理活动下降^[13]。2012年降雨相对较多,6—10月间降雨量为280 mm,由于降雨补充到土壤中,使植物根区土壤水分含量均大于10%,土壤未达到极度干旱状态,植物正常生长,因此2012年羊草净光合速率和蒸腾速率均大于2011年。2012年降雨的增加,使潜水毛细上升量有所降低,1.0 m和1.8 m潜水埋深的植物根区土壤仍然受到潜水的补给,毛细上升量分别为62.6 mm和26.8 mm,1.8 m以上的潜水埋深毛细上升量较少,为7.1—7.6 mm。由于光合作用过程需要水分并且通过水分运载的矿质养分的不断供应,以至于一般光合速率高,蒸腾速率也较高。因此具有毛细上升作用的潜水是促进植物生长的重要水分来源。

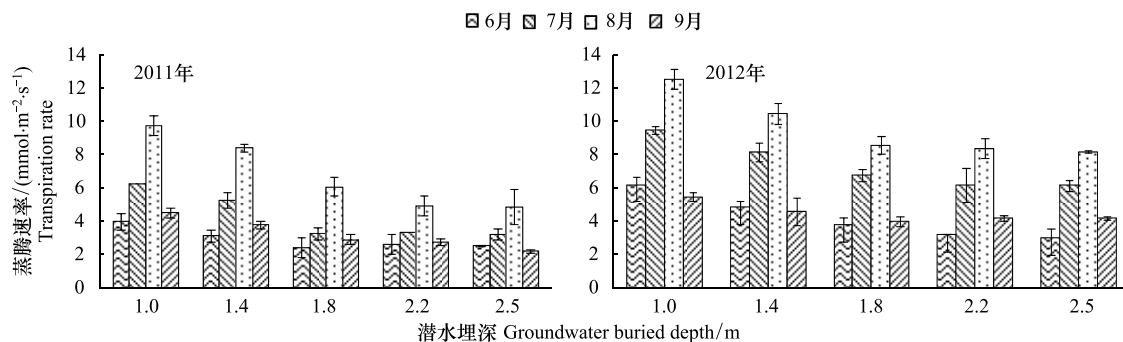


图2 不同潜水埋深下不同月份羊草蒸腾速率

Fig. 2 Leaf transpiration rate of *Leymus chinensis* in different month under different groundwater buried depth

2.2 不同潜水埋深下羊草净光合速率和蒸腾速率日变化

由图3可知,不同潜水埋深羊草净光合速率日变化均符合双峰曲线,具有明显的“午休”现象。随着潜水埋深的增加,光合速率降低,双峰曲线趋于平缓。不同年之间比较,2011年五种潜水埋深羊草净光合速率第一个峰值要远大于第二个峰值,不同的潜水埋深下,其峰值出现的时间不同。1.0—1.8 m潜水埋深下,羊草净光合速率第一个峰值在10:00,第二个峰值在16:00,而2.2 m和2.5 m第一个峰值在9:00和8:00,第二个峰值17:00,较其它三种潜水埋深推后1小时出现。即随着潜水埋深的增加,第一个峰值出现的时间提前,而第二个峰值出现的时间退后。2012年8月羊草净光合速率第一个峰值与第二个峰值较接近。羊草净光合速率在1.0 m潜水埋深下,第一个峰值在上午11:00,其它四种埋深均在上午10:00,第二个峰值均出现在16:00。

由图4可知,不同潜水埋深下羊草蒸腾速率日变化与羊草净光合速率变化趋势一致,均符合双峰曲线,且随着潜水埋深的增加蒸腾速率降低。不同年比较,2011年不同潜水埋深下羊草蒸腾速率第一个峰值均出现在10:00,1.0—1.8 m潜水埋深下羊草蒸腾速率第二个峰值在16:00,2.2和2.5 m潜水埋深下的羊草蒸腾速率第二个峰值在17:00,较其它埋深推后了1小时。2012年8月羊草蒸腾速率日变化第一个峰值与第二个峰值较接近。羊草蒸腾速率第一个峰值均在10:00,第二个峰值在16:00。不同潜水埋深之间比较,1.0 m和1.4 m潜水埋深下羊草净光合速率和蒸腾速率明显高于其它潜水埋深。1.8 m潜水埋深介于之间,2.2—2.5 m潜水埋深下,羊草蒸腾速率较低,说明潜水埋深的不同,直接影响羊草植物的正常生理活动。

以上结果说明羊草净光合速率和蒸腾速率日变化均具有明显的午休现象,该结果与以前的研究结果一致^[8,9,18]。随着潜水埋深的增加,羊草叶片净光合速率和蒸腾速率日变化曲线降低,且变化曲线趋于平缓。分析原因,当潜水埋深较浅时,地下水通过毛细上升作用到达植物根区,使土壤水分得到补充。在水分充足下,气候条件的差异(温度、大气湿度以及光合有效辐射等)对羊草的净光合速率和蒸腾速率有极大影响^[18]。

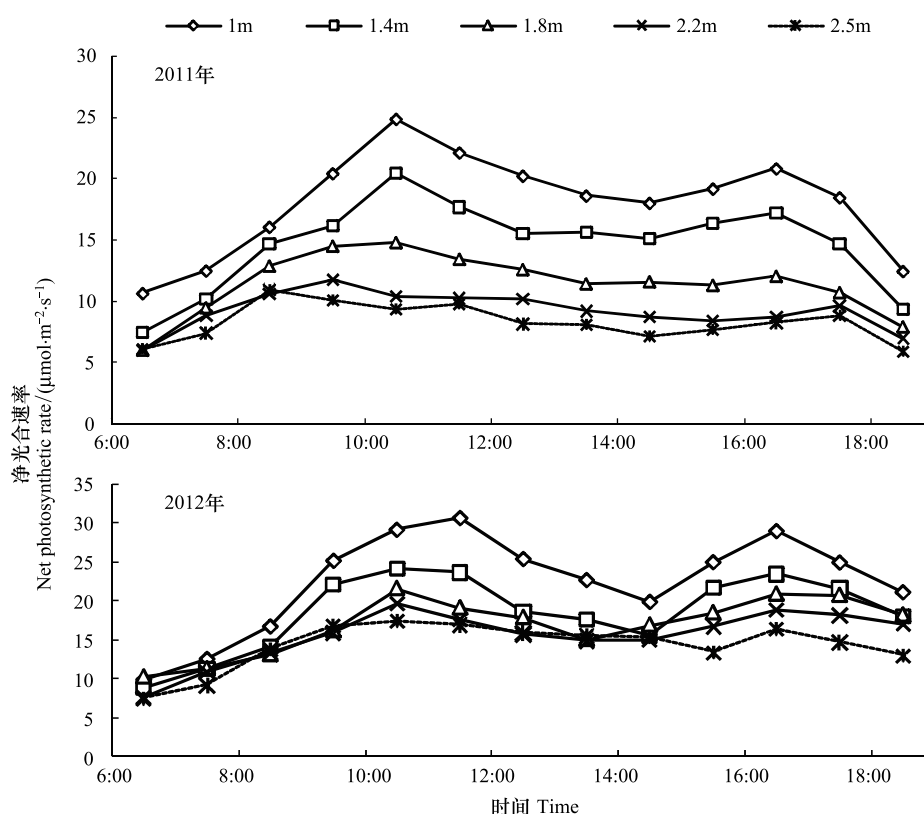


图3 不同潜水埋深下羊草净光合速率日变化

Fig. 3 The diurnal variations of leaf net photosynthesis rate of *Leymus Chinense* under different groundwater buried depth

随着光合有效辐射的不断加强,可能导致叶片吸收的光能出现过剩,同时伴随着其他环境因素的变化,如空气中 CO_2 供应不足,气孔阻力和暗呼吸速率的增加等,使光合净速率出现午休现象,而在第二个峰值之后,随着气温和光照的减弱,羊草净光合速率减弱。蒸腾速率日变化与净光合速率日变化相似,一致出现午休现象。这可能是因为蒸腾速率受气孔调节的影响,上午随着光合有效辐射的增强,叶温升高,相对湿度降低,蒸腾加剧,叶片内水分暂时亏缺,叶面蒸汽压亏缺加大,以致呼吸气孔出现部分关闭,从而导致正午蒸腾速率的降低,之后随着光合有效辐射和温度的减弱,蒸腾也逐渐恢复,以致达到第2个峰值^[8-9]。随着潜水埋深的增加,当潜水埋深大于1.8m时,潜水的毛细上升能力减弱,无法补充到植物根区土壤,致使羊草根区土壤缺水,在极度干旱时,土壤水分胁迫使最大净光合速率、光饱和点、表观量子效率以及水分利用效率降低,而光补偿点升高^[9]。同时高温加强了干旱对叶片生长和气体交换的影响,降低了羊草对土壤干旱的适应能力^[16]。因此在干旱的情况下,地下水埋深较深的羊草在土壤水缺乏的情况下,其生理活动较其它植物更低,因此表现为净光合速率和蒸腾速率明显下降,其峰值出现的时间也不规律,出现第一个峰值提前,第二个峰值推后的现象。从两年数据表明潜水埋深对植物的光合特征起到了重要作用。

2.3 净光合速率和蒸腾速率与潜水埋深的关系

2.3.1 净光合速率与潜水埋深的关系

不同月份羊草叶片净光合速率(2011年和2012年平均值)与潜水埋深进行回归分析。由表1可知,不同月份羊草净光合速率与潜水埋深呈幂函数关系,决定系数均在0.94以上。因此说明,潜水埋深对羊草净光合作用具有重要的影响,可以用幂函数关系式来估算不同潜水埋深下不同月份羊草的净光合速率。

羊草净光合速率具有明显的日变化规律,将羊草不同时间的净光合速率(2011年与2012年平均值)与潜水埋深进行回归分析,光合速率从6:00开始到18:00点结束,每2小时1次。由表2可知,6:00—18:00之间,羊草净光合速率与潜水埋深具有回归关系,其中6:00,8:00和12:00羊草的净光合速率与潜水埋深呈幂

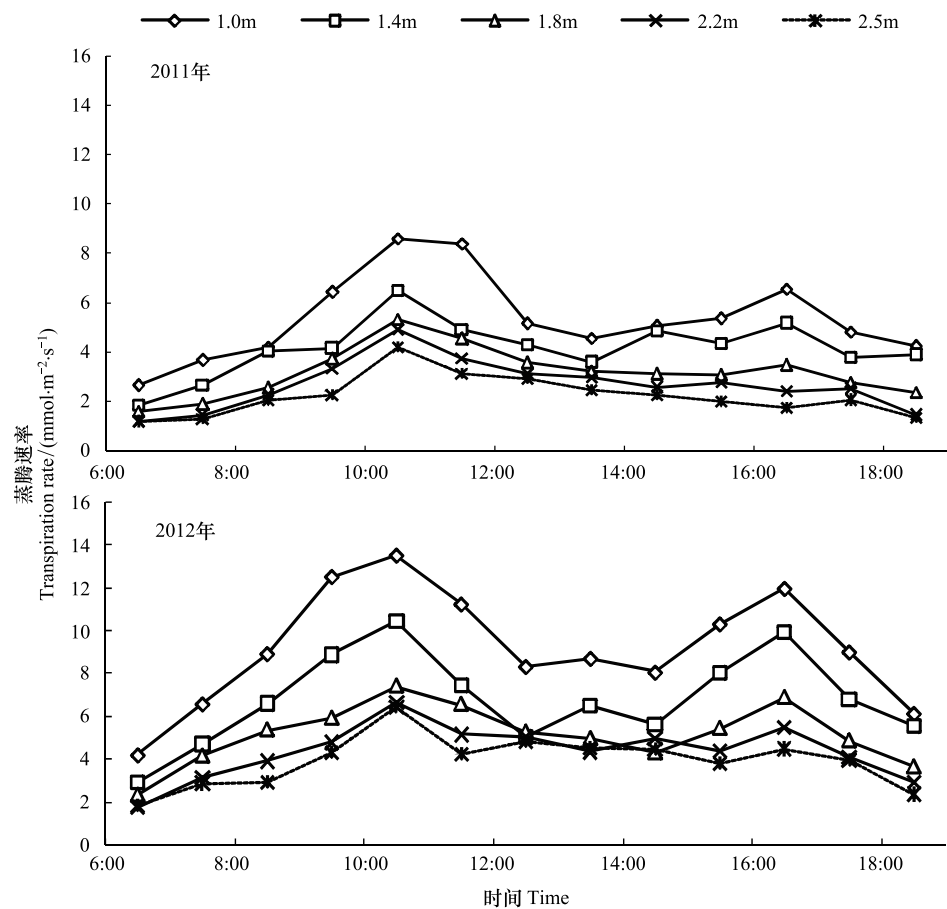


图 4 不同潜水埋深下羊草蒸腾速率日变化

Fig. 4 The diurnal variations oftranspiration rate of *Leymus Chinense* under different groundwater buried depth

表 1 不同月份羊草净光合速率与潜水埋深的回归分析

月份 Month	回归方程 Regression equation	决定系数 Coefficient of determination R^2
6 月 June	$Y=13.583X^{-0.556}$	0.9810
7 月 July	$Y=21.866X^{-0.5853}$	0.9654
8 月 August	$Y=27.237X^{-0.6101}$	0.9842
9 月 September	$Y=15.838 X^{-0.5111}$	0.9423

Y 为净光合速率, X 为潜水埋深。

表 2 不同时间羊草净光合速率与潜水埋深的回归分析

时间 Time	回归方程 Regression equation	决定系数 Coefficient of determination R^2
6:00	$Y = 10.023 X^{-0.4382}$	0.9194
8:00	$Y = 16.171X^{-0.3398}$	0.9458
10:00	$Y = -15.073\ln(X) + 27.097$	0.9987
12:00	$Y = 22.369 X^{-0.6856}$	0.9911
14:00	$Y = -8.303\ln(X) + 18.703$	0.9822
16:00	$Y = 39.368e^{-0.472X}$	0.9966
18:00	$Y = 23.047e^{-0.3316X}$	0.9206

Y 为净光合速率, X 为潜水埋深。

函数关系。16:00 和 18:00 羊草的净光合速率与潜埋深呈指数函数关系。10:00 和 14:00 羊草净光合作用与潜埋深呈对数函数关系。且各个回归方程的决定系数均在 0.9 以上,具有可靠性,因此可以用回归关系式来计算不同潜埋深下不同时间段羊草净光合速率。

2.3.2 蒸腾速率与潜埋深的关系

不同月份羊草蒸腾速率(2011 年与 2012 年平均值)与潜埋深进行回归分析。表 3 可见,羊草不同月份蒸腾速率与潜埋深呈幂函数关系,决定系数均在 0.94 以上,回归方程具有很好的模拟效果,因此可以用幂函数方程来估算不同潜埋深下不同月份羊草的蒸腾速率。

表 3 不同月份羊草蒸腾速率与潜埋深的回归分析

Table 3 Regression analysis of leaf transpiration rate of *Leymus Chinense* in different month under different groundwater buried depth

月份 Month	回归方程 Regression equation	决定系数 Coefficient of determination R^2
6 月 June	$Y = 5.0171X^{-0.6884}$	0.9747
7 月 July	$Y = 7.9102X^{-0.6198}$	0.9427
8 月 August	$Y = 11.253X^{-0.6324}$	0.9709
9 月 September	$Y = 4.9314X^{-0.4811}$	0.9484

Y 为蒸腾速率, X 为潜埋深。

羊草蒸腾速率具有明显的日变化规律,且在不同潜埋深下,其日变化规律不同(图 4),将羊草在不同时间下的蒸腾速率(2011 年与 2012 年平均值)与潜埋深进行回归分析,探讨不同时间的蒸腾速率与潜埋深的关系。表 4 可见,18:00 羊草蒸腾速率与潜埋深的回归关系为对数函数关系,8:00 和 16:00 羊草蒸腾速率与潜埋深的回归关系为指数函数关系,其它时间为幂函数关系。决定系数均在 0.9 以上,具有很好的模拟效果,因此可以用回归方程模拟不同潜埋深下不同时间段羊草蒸腾速率。

表 4 不同时间羊草蒸腾速率与潜埋深的回归分析

Table 4 Regression analysis of leaf transpiration rate of *Leymus Chinense* in different time under different groundwater buried depth

时间 Time	回归方程 Regression equation	决定系数 Coefficient of determination R^2
6:00	$Y = 3.3433X^{-0.9377}$	0.9769
8:00	$Y = 12.794e^{-0.6487X}$	0.9973
10:00	$Y = 10.94X^{-0.8156}$	0.9855
12:00	$Y = 6.2683X^{-0.5618}$	0.9047
14:00	$Y = 6.4664X^{-0.744}$	0.9383
16:00	$Y = 20.025e^{-0.7399X}$	0.9936
18:00	$Y = -3.959\ln(X) + 5.4639$	0.9486

Y 为蒸腾速率, X 为潜埋深。

3 结论

(1) 羊草叶片净光合速率和蒸腾速率季节变化明显,呈单峰曲线,最高值均出现在植物生长的旺盛时期 7、8 月份。羊草净光合速率和蒸腾速率具有明显的日变化规律,呈双峰曲线,具有午休现象。潜埋深在 1.0—2.5m 之间,羊草净光合速率和蒸腾速率受潜埋深影响较大,随着潜埋深的增加,不同月份羊草净光合速率和蒸腾速率下降明显,羊草净光合速率和蒸腾速率日变化也随着潜埋深的增加而降低,且随着潜埋深的增加,日变化的峰值出现时间也发生变化。

(2) 羊草净光合速率和蒸腾速率与潜埋深在不同月份均呈幂函数关系,相关系数均在 0.90 以上,具有很好的模拟效果,因此可以用幂函数方程估算不同潜埋深下的各个月份羊草的净光合速率和蒸腾速率。羊草净光合速率和蒸腾速率日变化中,不同时间羊草净光合速率和蒸腾速率与潜埋深的回归关系为指数函数、幂函数和对数函数关系,相关系数均在 0.90 以上,具有很好的模拟效果,因此可以用回归方程来模拟不同

潜水埋深下各个时间的羊草净光合速率和蒸腾速率。

参考文献(References):

- [1] 安乐生, 赵全升, 叶思源, 刘贯群, 丁喜桂. 黄河三角洲地下水关键水盐因子及其植被效应. 水科学进展, 2011, 22(5): 689-695.
- [2] Múguas C, Rascher K G, Martins-Loução A, Carvalho P, Pinho P, Ramos M, Correia O, Werner C. Responses of woody species to spatial and temporal ground water changes in coastal sand dune systems. Biogeosciences, 2011, 8(12): 3823-3832.
- [3] Ma JZ, Qian J, Gao QZ. Groundwater evolution and its influence on the fragile ecology in the south edge of Tarim Basin. Journal of Desert Research, 2000, 20(2): 145-149.
- [4] Antonellini M, Mollema P N. Impact of groundwater salinity on vegetation species richness in the coastal pine forests and wetlands of Ravenna, Italy. Ecological Engineering, 2010, 36(9): 1201-1211.
- [5] Horton JL, Kolb T E, Stephen C. Physiological response to groundwater depth varies among species and with river flow regulation. Ecological Applications, 2001, 11(4): 1046-1059.
- [6] Miller GR, Chen XY, Rubin Y, Ma SY, Baldocchi DD. Groundwater uptake by woody vegetation in a semiarid oak savanna. Water Resources Research, 2010, 46(10): W10503, doi: 10.1029/2009WR008902.
- [7] 杜占池, 杨宗贵. 不同土壤型羊草光合和蒸腾作用特征的比较研究. 植物学报, 1995, 37(1): 66-73.
- [8] 李林芝, 张德罡, 辛晓平, 闫玉春, 杨桂霞, 李瑾, 王旭. 呼伦贝尔草甸草原不同土壤水分梯度下羊草的光合特征. 生态学报, 2009, 29(10): 5271-5279
- [9] 杜占池, 杨宗贵. 土壤水分充足条件下羊草和大针茅光合速率午间降低的原因. 植物生态学与地植物学学报, 1989, 13(2): 106-113.
- [10] 王玉辉, 周广胜. 松嫩草地羊草叶片光合作用生理生态特征分析. 应用生态学报, 2001, 12(1): 75-79.
- [11] 王云龙, 许振柱, 周广胜. 水分胁迫对羊草光合产物分配及其气体交换特征的影响. 植物生态学报, 2004, 28(6): 803-809.
- [12] 宋长春, 何岩, 邓伟. 松嫩平原盐渍土壤生态地球化学. 北京: 科学出版社, 2003.
- [13] Yang F, Zhang GX, Yin XR, Liu ZJ, Huang ZG. Study on capillary rise from shallow groundwater and critical water table depth of a saline-sodic soil in western Songnen plain of China. Environmental Earth Sciences, 2011, 64(8): 2119-2126.
- [14] 刘兴土. 松嫩平原退化土地整治与农业发展. 北京: 科学出版社, 2001.
- [15] 于晓娜, 赵杰, 祁瑜, 黄永梅, 龚吉蕊. 羊草和紫花苜蓿生长特征及光合特性对不同土壤水分的响应. 生态学报, 2014, 34(21): 6067-6075.
- [16] 许振柱, 周广胜, 李晖. 羊草叶片气体交换参数对温度和土壤水分的响应. 植物生态学报, 2004, 28(3): 300-304.
- [17] 陈效述, 周萌, 郑婷, 张荣菊. 呼伦贝尔草原羊草(*Leymus chinensis*)光合速率的季节变化-以鄂温克旗牧业气象试验站为例. 生态学报, 2008, 28(5): 2005-2012.
- [18] 邓钰, 柳小妮, 辛晓平, 闫瑞瑞, 王旭, 杨桂霞, 任正超. 不同放牧强度下羊草的光合特性日动态变化-以呼伦贝尔草甸草原为例. 草业学报, 2012, 21(3): 308-313.