

福建平潭岛海岸不同演化阶段草丛沙堆表面老鼠茅叶水势日变化特征

杨显基 杜建会* 秦晶 陈志华 杨林 宋爽

(中山大学地理科学与规划学院/广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室, 广州 510275)

摘要 以福建省平潭岛海岸不同演化阶段草丛沙堆表面典型沙生植物老鼠茅为对象, 研究其叶水势日变化特征及其影响因素. 结果表明: 老鼠茅叶水势日变化以“W”型为主, 午间出现短暂升高现象. 发育阶段沙堆表面老鼠茅叶水势日均值较稳定阶段高, 且夜间水分恢复能力更强; 老鼠茅叶水势与大气水势和相对湿度呈显著正相关, 与气温呈显著负相关, 但与不同深度土壤水势无显著相关性; 发育阶段沙堆丘间地老鼠茅叶水势在 10:00—16:00 皆高于迎风坡和背风坡, 迎风坡除 10:00 和 12:00 外皆低于背风坡. 不同坡位叶水势日变异程度表现为背风坡>迎风坡>丘间地, 但无显著差异. 沙堆迎风坡老鼠茅叶水势与大气水势和相对湿度呈显著正相关, 与气温呈显著负相关; 沙堆背风坡和丘间地老鼠茅叶水势与气象因子有一定相关性, 但不显著.

关键词 沙生植物; 老鼠茅; 水势; 演化阶段

Diurnal variation characteristics of leaf water potential of *Spinifex littoreus* on the nebkhas in different succession periods on the coast of Pingtan Island, Fujian Province, China. YANG Xian-ji, DU Jian-hui*, QIN Jing, CHEN Zhi-hua, YANG Lin, SONG Shuang (School of Geography and Planning, Sun Yat-Sen University/Guangdong Key Laboratory for Urbanization and Geosimulation, Guangzhou 510275, China).

Abstract: Diurnal variation and its influencing factors of leaf water potential (ψ_1) of *Spinifex littoreus* on the nebkhas in two succession periods were measured on the coast of Pingtan Island, Fujian Province. The results showed that the diurnal variation of ψ_1 of *S. littoreus* mainly demonstrated a ‘W’ curve pattern, with a temporary rise at midday. The mean ψ_1 of *S. littoreus* on the nebkhas at developing stage was higher than that at stabilizing stage, and recovered better during the night. ψ_1 of *S. littoreus* was positively related to the atmospheric water potential (ψ_a) and relative humidity, negatively related to air temperature, but had no significant correlation with the soil water potential at different depths. ψ_1 of *S. littoreus* on the interdune depression at developing stage was higher than that on the windward slope and on the leeward slope from 10:00 to 16:00, and that on the windward slope was lower than that on the leeward slope all day long except at 10:00 and at 12:00. The variation of ψ_1 of *S. littoreus* on the leeward slope was higher than that on the windward slope, and the minimal variation was found on the interdune depression, without statistical significance. ψ_1 of *S. littoreus* on the windward slope was positively correlated with ψ_a and relative humidity, while negatively correlated with air temperature. ψ_1 of *S. littoreus* on the leeward slope and the interdune depression were correlated with meteorological factors, but they had no significant relationship.

Key words: psammophyte; *Spinifex littoreus*; water potential; succession period.

本文由国家自然科学基金项目(41101011, 41371030)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(121gpy15, 15lgjc38)资助. This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41101011, 41371030) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (121gpy15, 15lgjc38).

2017-03-30 Received, 2017-07-27 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dujh1982@hotmail.com

沙生植物是海岸沙地生态系统的重要组成部分, 主要分布于高潮位线以上不同沙丘类型表面及其邻近海滩^[1-3]. 海岸沙地极端干旱、贫瘠, 且受盐沫飞溅及强台风等影响, 沙丘前缘沙生植物受到的环境胁迫相对内陆地区更大, 而水势高低可以直接反映其受到环境胁迫的程度大小^[4]. 植物作为土壤-植物-大气连续体系统 (soil-plant-atmosphere continuum, SPAC) 的中间部分, 其水势的变化既与土壤水势有关, 也受区域气象因素影响^[5-7]. Klepper^[8] 研究发现, 梨树 (*Pyrus communis*) 和杏树 (*Prunus armeniaca*) 的叶水势日变化呈“V”型或“W”型, 主要与土壤水分含量有关. 曾凡江等^[9] 研究发现, 土壤水分相对充足时, 柽柳 (*Tamarix ramosissima*) 和胡杨 (*Populus euphratica*) 叶茎水势日变化均呈明显的“V”型变化, 水分相对不足时则呈不明显的“V”型变化. 付爱红等^[10] 对胡杨和俄罗斯杨 (*Populus russkii*) 的研究也发现类似规律. 可见, 植物水势的日变化特征主要与其受到的土壤干旱胁迫程度有关. 除了受土壤水势影响外, 植物水势也与气象要素有关^[11-12]. 胡继超等^[13] 研究发现, 柽柳茎水势日变化与相对湿度和大气水势呈正相关, 与气温呈负相关. Coolong 等^[14] 研究发现, 辣椒 (*Capsicum annum*) 叶水势与气温和太阳辐射强度呈显著正相关, 与相对湿度呈显著负相关, 认为在水分充足情况下, 其叶水势主要受气象因子影响而不是土壤水势.

目前, 关于胁迫环境下植物水势的日变化特征及其影响因素已经有了较为深入的探讨^[8-15], 但主要集中在内陆地区^[8-13], 海岸地区尚不多见, 且仅有的研究集中在发育阶段草丛沙堆表面沙生植物水势的日变化特征^[16]. 海岸沙丘面积虽小, 但生境类型多样, 环境因子复杂, 从潮上带至海岸防护林带, 依次出现发育和稳定阶段的草丛沙堆, 其水分和盐分含量依次降低, 风沙流胁迫减小, 有机质含量升高 (表 1), 表面植被呈现出明显的带状分布^[1-3]. 此外, 沙堆不同坡位风沙流场存在很大差异, 导致侵蚀堆积程度和水热条件各异, 且距海越近, 不同坡向植被分布差异越明显^[17-19]. 丘间地地下水位浅且相对湿度大, 往往也成为很多物种的栖息地^[20-21]. 不同演化阶段沙堆表面生境差异显著, 从发育到稳定阶段, 群落组成也由老鼠茅 (*Spinifex littoreus*) 为主的单一优势种过渡为包括老鼠茅在内多个物种共生的现象. 本文研究了不同演化阶段沙堆表面均有分布的优势种老鼠茅叶水势特征及其影响因素, 探讨海岸典型沙生植物对于不同环境胁迫程度的响应特征及

其差异, 为海岸沙地生态系统保护与恢复提供科学参考.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区坛南湾位于平潭岛东南侧 (25°26′36″—25°26′48″ N, 119°46′9″—119°46′21″ E)^[16]. 平潭地处亚热带半湿润海洋性季节气候区域, 年均温 19.5℃, 年均降水量 1151 mm, 主要集中在 4—9 月, 占全年总降水量的 70%~80%. 年蒸发量 1300 mm, 年均相对湿度 81%. 3—6 月以南西南 (SSW) 风向为主, 其余各月常风向均为北东北 (NNE) 风向, 年平均风速 6.9 m·s⁻¹, 年均 8 级风天数 73.6 d. 受季风尤其是台风的强烈影响, 据统计 1981—2010 年间台风影响平潭合计 98 次, 一般每年 2~5 次, 多出现在 7—9 月, 受台风影响最大风速为 32.7 m·s⁻¹, 常引发 17.2 m·s⁻¹ 以上大风. 坛南湾属砂质海滩, 海滩平均宽度 480 m, 滩面平均坡度 0.9°, 年均 H1/10 波高为 1.1 m, 平均潮差 4.24 m; 沙丘粒度组成以中沙和细沙为主. 坛南湾维管植物 28 科 53 属 54 种, 以菊科和禾本科为主, 主要有老鼠茅、海边月见草 (*Oenothera drummondii*)、狗牙根 (*Cynodon dactylon*)、光梗阔苞菊 (*Pluchea pteropoda*)、海马齿 (*Sesuvium portulacastrum*)、多枝扁莎 (*Pycnus polystachyus*) 等^[16]. 老鼠茅为坛南湾海岸草丛沙堆表面的优势种, 系多年生小灌木状草本, 主要以水平匍匐和垂直向上生长为主, 夏季生长旺期, 能防风固沙, 为优良的海边固沙植物.

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择 2015 年 8 月 12 和 16 日, 台风后天气较晴朗, 选择植物生长良好、无动物侵袭、无污染物侵染、无人为干扰的地段为试验地. 老鼠茅沙堆样地选择在高潮位线以上, 基本不受波浪的直接影响 (图 1 和表 1). 其中, 发育阶段沙堆迎风坡平均长 4 m, 背风坡平均长 4.5 m, 高度约 2 m, 迎风坡平均坡度 30°; 稳定阶段沙堆迎风坡平均长 7.5 m, 背风坡平均长 8.5 m, 高度约 4.5 m, 迎风坡平均坡度 20°. 不同演化阶段沙堆老鼠茅叶片水势日变化的植株采样部位均为丘顶 (8 月 12 日), 沙堆不同坡位老鼠茅叶水势日变化的采样部位为发育阶段沙堆的迎风坡、背风坡和丘间地 (8 月 16 日), 发育阶段和稳定阶段沙堆老鼠茅各设 3 个样方, 每个坡位设 1 个样方, 样方大小为 50 cm×50 cm.

表 1 样地基本概况及植被特征

Table 1 Basic situation and vegetation characteristics of the sampling sites (mean±SD)

采样地点 Sample site	坡位 Slope position	土壤电导率 Soil electric conductivity ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	pH	全磷 Total P ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有机质 Soil organic matter ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮 Total N ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	植被特征 Vegetation characteristics
发育阶段沙堆 Nebkhas at developing stage	迎风坡 Windward slope	54.2±10.1	8.25±0.16	82.5±1.2	0.991±0.115	-	植被盖度 70% ,平均高度 50 cm 植被主要以老鼠茅为主 Vegetation coverage was 70% and the average height was 50 cm. <i>Spinifex littoreus</i> was the main species
	丘顶 Top	52.1±4.2	8.25±0.19	58.7±6.5	0.875±0.020	-	
	背风坡 Leeward slope	55.4±5.8	7.57±0.69	66.0±21.9	0.996±0.095	-	
	丘间地 Interdune lowland	54.0±5.0	8.30±0.47	60.6±3.9	0.806±0.151	-	
	均值 Mean	54.0±5.2	8.09±0.46	66.9±13.3	0.917±0.012	-	
稳定阶段沙堆 Nebkhas at stabilizing stage	迎风坡 Windward slope	45.0±2.9	8.14±0.16	62.0±25.3	1.432±0.048	-	植被盖度 90% ,平均高度 40 cm 植被组成主要有光梗阔苞菊、海边月见草、狗牙根和老鼠茅等 Vegetation coverage was 90% and average height was 40 cm. <i>Pluchea pteropoda</i> , <i>Oenothera drummondii</i> , <i>Cynodon dactylon</i> and <i>Spinifex littoreus</i> were the main species
	丘顶 Top	43.9±7.5	8.10±0.17	57.4±11.0	1.275±0.147	-	
	背风坡 Leeward slope	44.7±9.4	8.24±0.51	58.3±12.2	1.182±0.118	-	
	丘间地 Interdune lowland	53.5±6.0	8.11±0.13	73.0±13.7	2.139±0.182	-	
	均值 Mean	46.7±6.7	8.15±0.23	62.6±14.2	1.507±0.414	-	

- 测不出 Cannot be measured.

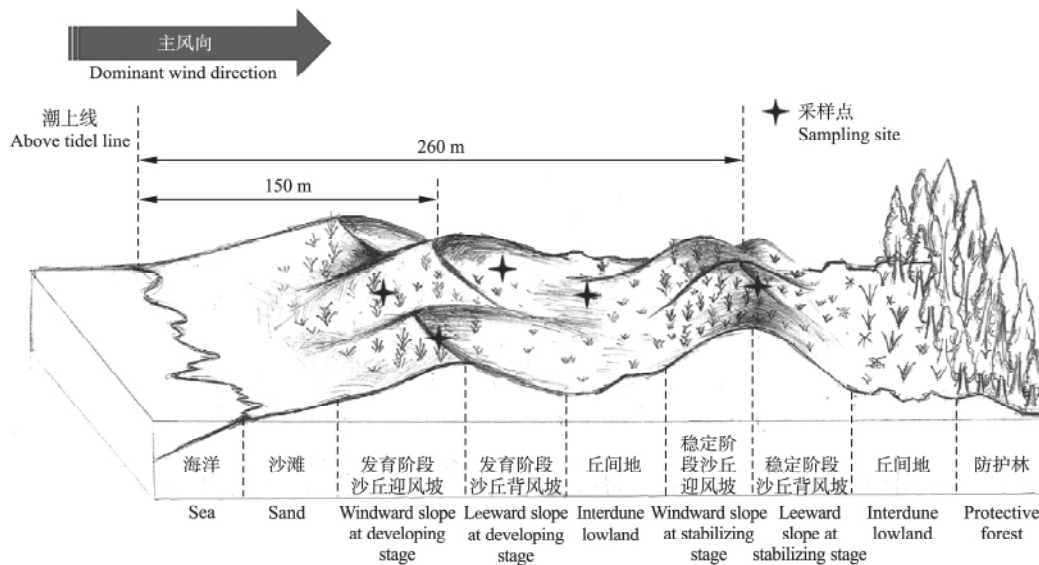


图 1 迎风坡、背风坡和丘间地构成单元沿主风向的纵剖面示意图

Fig.1 Longitudinal section of constituent units of windward slope, leeward slope and interdune lowland in the main wind direction.

1.2.2 叶片选择及指标测定 2015 年 8 月 12 日和 16 日,天气晴朗,采用美国 WESCOR 公司生产的 PSYPRO 水势测量系统,6:00—18:00,每隔 2 h 测定 1 次。叶水势测定:选择样方内阳面生长发育良好的老鼠茅上叶位叶片,用打孔器取叶,放入水势测量系统 C-52 样品室,平衡 30 min 后进行测定,重复测定 3 次数据,取平均值作为该时刻的叶水势;土壤水势测定:在沙堆顶部中间垂直往下挖一个土壤剖面,分别在沙堆顶部以下 30、50、80 和 120 cm 的土壤深

度处安放探头,并且注意防止探头接触植物根系,然后把挖开的剖面掩埋,尽量恢复到原来的沙堆形态,之后平衡 37 h,于 6:00 开始测定,重复测定 3 次,取均值^[16,22]。

空气温度(T)、相对湿度(RH)等气象因子采用 HYGROPALMHP21 手持温湿度表(瑞士 Rotronic)在距植物表面 20 cm 处同步观测。

大气水势(Φ_a , MPa)采用公式^[23]:

$$\Phi_a = 4.6248 \times 10^5 T \ln RH$$

式中: T 为空气绝对温度 ($^{\circ}\text{C}$); RH 为空气相对湿度 (%) .

1.3 数据处理

采用 Excel 2010 和 Origin 8.5 软件对数据进行统计分析和作图. 运用 SPSS 20.0 软件对沙堆不同坡位老鼠茅叶水势日变化进行单因素方差分析, 对不同演化阶段老鼠茅叶水势日变化进行独立样本 t 检验和用 Pearson 相关分析法分析叶水势与大气水势、气温、相对湿度和土壤水势之间的相关性 ($\alpha = 0.05$) .

2 结果与分析

2.1 不同演化阶段沙堆表面老鼠茅叶水势日变化

由图 2 可以看出, 发育阶段沙堆老鼠茅叶水势日变异程度为 0.29, 呈明显的“W”型. 6:00 叶水势最高, 为 -0.49 MPa, 12:00 达到一天中的较低值 -1.33 MPa, 14:00 回升达 -1.22 MPa, 16:00 下降到一天中的最低值 -1.39 MPa, 18:00 上升至 -0.94 MPa. 稳定阶段沙堆老鼠茅叶水势日变异程度为 0.12, 呈较平缓的“W”型. 6:00 叶水势处于一日中最高值 -0.90 MPa, 但显著低于发育阶段, 10:00 达到一天中的较低值 -1.25 MPa, 14:00 降至一天中的最低值 -1.29 MPa, 18:00 上升达 -1.03 MPa. 老鼠茅叶水势日均值总体表现为发育阶段沙堆 (-1.15 MPa) 大于稳定阶段沙堆 (-1.10 MPa), 但差异不显著.

2.2 发育阶段沙堆不同坡位老鼠茅叶水势日变化

由图 3 可以看出, 迎风坡叶水势日变化呈较显著的“W”型, 6:00 的叶水势为 -1.07 MPa, 10:00 降至一天中的最低值 -1.48 MPa, 12:00 回升达 -1.37 MPa, 14:00 下降至一天中的较低值 -1.40 MPa,

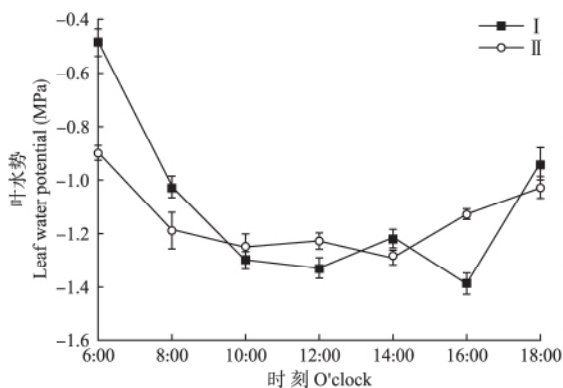


图 2 不同演化阶段沙堆老鼠茅叶水势日变化

Fig.2 Diurnal variation of leaf water potential of *Spinifex littoreus* on the nebkhas in different succession periods.

I: 发育阶段 Developing stage; II: 稳定阶段 Stabilizing stage.

18:00 水势回升到一天中最高值 -0.77 MPa; 背风坡叶水势日变化大致呈“V”型. 6:00 叶水势 -1.02 MPa, 10:00 下降到一天中最低值 -1.51 MPa, 18:00 升至一天中最高值 -0.82 MPa; 丘间地叶水势日变化大致呈较平缓的“W”型, 6:00 叶水势为 -1.07 MPa, 10:00 降到一天中的最低值 -1.2 MPa, 18:00 达到 -1.02 MPa. 沙堆不同坡位老鼠茅叶水势平均值表现为丘间地 (-1.10 MPa) > 背风坡 (-1.15 MPa) > 迎风坡 (-1.22 MPa). 而叶水势大小日变异程度则表现为背风坡 ($CV = 21\%$) > 迎风坡 ($CV = 20\%$) > 丘间地 ($CV = 6\%$), 但差异不显著. 迎风坡 (-1.07 MPa)、背风坡 (-1.02 MPa) 和丘间地 (-1.07 MPa) 清晨 (6:00) 叶水势差异不显著, 表明 3 个坡位老鼠茅夜间水分恢复能力差异不大.

2.3 不同演化阶段沙堆表面老鼠茅叶水势变化的主要影响因素

2.3.1 土壤水势 不同演化阶段沙堆老鼠茅叶水势与 120 cm 土层土壤水势具有一定的相关性, 但均不显著, 与 30、50 和 80 cm 土层土壤水势无显著相关性.

2.3.2 气象因子 由表 2 表明, 发育阶段沙堆老鼠茅叶水势与大气水势和相对湿度呈显著正相关, 与气温呈显著负相关. 稳定阶段沙堆老鼠茅叶水势与大气水势和相对湿度呈显著正相关, 与气温呈显著负相关.

表 3 表明, 发育阶段沙堆迎风坡老鼠茅叶片水势与气象因子的相关性显著, 而背风坡和丘间地叶片水势与气象因子有一定相关性, 但均不显著.

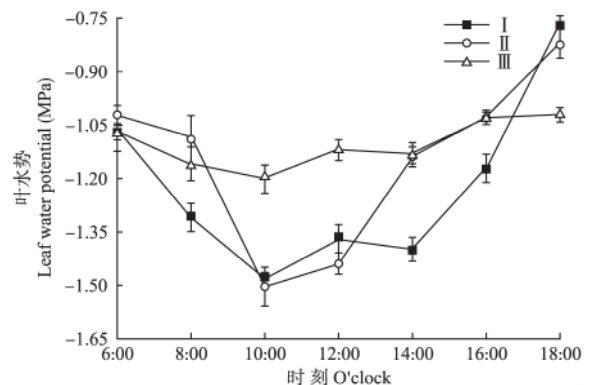


图 3 发育阶段沙堆不同坡位老鼠茅叶水势日变化

Fig.3 Diurnal variation of leaf water potential of *Spinifex littoreus* on different slope positions at the developing stage.

I: 迎风坡 Windward slope; II: 背风坡 Leeward slope; III: 丘间地 Interdune lowland.

表 2 不同演化阶段沙堆表面老鼠茅叶水势与大气水势、气温和相对湿度的相关关系

Table 2 Correlations of the leaf water potential of *Spinifex littoreus* on the nebkhas in different succession periods and with atmospheric water potential, air temperature and relative humidity

沙堆 Nebkhas	大气水势 Atmospheric water potential	气温 Air temperature	相对湿度 Relative humidity
发育阶段沙堆 Nebkhas at developing stage	0.895**	-0.884**	0.904**
稳定阶段沙堆 Nebkhas at stabilizing stage	0.701*	-0.768*	0.766*

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$. 下同 The same below.

表 3 发育阶段沙堆不同坡位老鼠茅叶水势与大气水势、气温和相对湿度的相关系数

Table 3 Correlation coefficients of the leaf water potential of *Spinifex littoreus* on different slope positions at the developing stage with atmospheric water potential, air temperature and relative humidity

坡位 Slope position	大气水势 Atmospheric water potential	气温 Air temperature	相对湿度 Relative humidity
迎风坡 Windward slope	0.797*	-0.800*	0.821*
背风坡 Leeward slope	0.301	-0.431	0.460
丘间地 Interdune lowland	0.370	-0.459	0.468

3 讨 论

3.1 不同演化阶段沙堆表面老鼠茅叶水势变化特征

有研究发现,植物水势日变化特征与其遭受干旱胁迫的程度有关.其受干旱胁迫的强度越弱,水势日变化呈现的“V”型越明显^[10].本研究表明,除发育阶段沙堆背风坡老鼠茅叶水势日变化大致呈“V”型外,稳定阶段和发育阶段沙堆其他坡位叶水势日变化均呈“W”型,其中,发育阶段变化幅度较稳定阶段大.主要在于发育阶段沙堆背风坡植被盖度小,且表面以流沙为主,有利于水分入渗,相对于其他坡位植株受到的土壤干旱胁迫程度更小,因此叶水势呈“V”型变化,这与大部分研究认为的植物叶水势服从早晚高午间低的规律一致^[10-12].而其他坡位植被盖度均较大,10:00 或 12:00 大部分叶水势降到一天中的最低值,但大气水势下降更多,使得叶-气水势差增大.植物蒸腾消耗了大量水分,导致土壤水分补给相对不足,水势快速下降.随着水分的进一步消耗,老鼠茅为减少水分散失,通过暂时关闭叶片气

孔,促使其水势在 12:00 或 14:00 短时间内升高,有效减缓体内水分消耗,从而导致其水势日变化未呈现出“V”型,而以“W”型为主.此策略可能有利于老鼠茅在海岸沙地严重胁迫下定居,并成为优势种^[16].

3.2 不同演化阶段沙堆表面老鼠茅叶水势与土壤水势及气象因子的关系

在海岸地区,植物遭受着干旱、高温等环境因子的胁迫^[24].且距海远近不同,植物受到的环境胁迫程度存在显著差异^[4, 25].本研究发现,发育阶段沙堆老鼠茅叶水势与气象因子关系更密切(表 2),且对外界环境变化的响应更敏感,导致其水势日变异程度较稳定阶段大.主要在于测定时间为台风后,强降雨对不同演化阶段草丛沙堆水分补给深度不同,发育阶段和稳定阶段沙堆水分下渗深度分别为 50 和 30 cm,这与杜建会等^[26]对强降雨后民勤地区不同演化阶段白刺(*Nitraria tangutorum*)灌丛沙堆土壤水分补给深度的研究类似.且前者表面植被盖度相对较低,物种数较少(表 1),对于水分的竞争小于后者,因此受到干旱胁迫相对较小^[9],其叶水势日变化与土壤水势无显著相关性,而对气象因子的响应则更敏感.但是土壤水分不足时,在未受台风影响时,其叶水势与 30 cm 深度土壤水势具有一定相关性,而与气象因子相关性不强^[16].

清晨叶水势可以反映植物水分的恢复能力,从而用来判断植物水分亏缺的程度^[27].从清晨(6:00)叶水势看,发育阶段(-0.49 MPa)显著高于稳定阶段(-0.90 MPa),表明发育阶段沙堆表面老鼠茅夜间水分恢复能力较强.主要在于发育阶段较稳定阶段沙堆土壤水分补给量多,表面植被盖度低,物种较少(表 1),对水分竞争较弱,且受沙埋影响,不定根增多,吸水效率增加,受干旱胁迫相对较小,因此夜间水分恢复能力较强,清晨叶水势也显著高于后者^[28-29].

3.3 发育阶段沙堆不同坡位老鼠茅叶水势变化特征及其与气象因子的关系

沙堆坡位是引起植物群落微环境出现异质性的的重要因素^[30],迎风坡基质流动、背风坡沙埋沙压和丘间低地潜水埋深等控制着沙地土壤水分的分布,导致不同坡位植物水势日变化不同^[18].背风坡较迎风坡老鼠茅叶水势日变化变异程度大,主要在于其 10:00 前没有受到太阳的直接照射,空气相对湿度高,叶片蒸腾速率小,随着太阳高度角增加,受到太阳直射,加上其植被盖度较小,沙丘裸露面积大,沙

面温度迅速升高,导致植株周围的气温较迎风坡高,此时大气水势快速下降,叶片蒸腾速率升高,叶水势快速下降,其变异程度也达到最大^[31]。与不同坡向相比,丘间地老鼠芳叶水势日变化最小,主要与该坡位大气水势(迎风坡、背风坡和丘间地大气水势变异系数分别为64%、77%和63%)日变化较小有关,加上空气相对湿度大,地下水位浅,良好的生境有利于老鼠芳维持较稳定的叶水势^[19-21]。此外,10:00迎风坡(-1.48 MPa)、背风坡(-1.51 MPa)和丘间地(-1.2 MPa)老鼠芳叶水势均降到了一天中的最低值,表明10:00时3个坡位的老鼠芳均受到了最大的干旱胁迫,可能是因为此时太阳辐射强烈、气温高、空气相对湿度低和大气水势较低,其叶片蒸腾强烈,导致叶水势急剧下降^[32]。

从沙堆不同坡位清晨叶水势看,迎风坡(-1.07 MPa)、背风坡(-1.02 MPa)和丘间地(-1.07 MPa)差异不显著,可能是强台风带来大量降雨,土壤水势较大,其受到干旱胁迫相对较小,经过一晚的时间,沙丘不同坡位的老鼠芳体内水分均能得到良好的恢复^[27]。相关分析表明,迎风坡老鼠芳叶水势与大气水势和空气相对湿度呈显著正相关,与气温呈显著负相关,而背风坡和丘间地虽然与气象因子有一定的相关性,但皆不显著(表3)。说明迎风坡老鼠芳叶水势对气象因子的响应更为敏感,而背风坡和丘间地则受到气象因子影响较小。迎风坡老鼠芳受太阳直射的影响,其叶水势变化能够与气象因子同步^[16]。而背风坡和丘间地则受局部地形遮挡和水文特征的影响,其表面老鼠芳受到的环境胁迫因子更多也更复杂,使得气象因子对其叶水势的影响程度降低^[16,33]。

参考文献

- [1] Du J-H (杜建会), Liu A-L (刘安隆), Dong Y-X (董玉祥), et al. Architectural characteristics of roots in typical coastal psammophytes of South China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2014, **38** (8): 888-896 (in Chinese)
- [2] Zhao Y-Y (赵艳云), Lu Z-H (陆兆华), Liu J-T (刘京涛), et al. Advance in distribution, adaptability and succession of plant communities in coastal dune. *Wetland Science* (湿地科学), 2014, **12** (3): 401-408 (in Chinese)
- [3] Du J-H (杜建会), Dong Y-X (董玉祥), Hu M-Y (胡绵友). The research progress and prospects of ecosystem services in coastal dunes. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2015, **35** (2): 479-486 (in Chinese)
- [4] Mrema AF, Granhall U, Sennerby-Forsse L. Plant growth, leaf water potential, nitrogenase activity and nodule anatomy in *Leucaena leucocephala* as affected by water stress and nitrogen availability. *Trees*, 1997, **12**: 42-48
- [5] Morte A, Lovisolo C, Schubert A. Effect of drought stress on growth and water relations of the mycorrhizal association *Helianthemum almeriense* - *Terfezia claveryi*. *Mycorrhiza*, 2000, **10**: 115-119
- [6] Donovan LA, Gris  DJ, West JB, et al. Predawn disequilibrium between plant and soil water potentials in two cold-desert shrubs. *Oecologia*, 1999, **120**: 209-217
- [7] Ruiz-Sánchez MC, Domingo R, Pérez-Pastor A. Daily variations in water relations of apricot trees under different irrigation regimes. *Biologia Plantarum*, 2007, **51**: 735-740
- [8] Klepper B. Diurnal pattern of water potential in woody plants. *Plant Physiology*, 1968, **43**: 1931-1934
- [9] Zeng F-J (曾凡江), Zhang X-M (张希明), Li X-Y (李向义), et al. Seasonal variation of *Tamarix ramosissima* and *Populus euphratica* water potentials in southern fringe of Taklamakan Desert. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**: 1389-1393 (in Chinese)
- [10] Fu A-H (付爱红), Chen Y-N (陈亚宁), Li W-H (李卫红). Analysis on the change of water potential of *Populus euphratica* Oliv. and *P. russkii* Jabl under different irrigation volumes in temperate desert zone. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 2010, **55** (6): 504-511 (in Chinese)
- [11] Gao M-W (高木旺), Nie P-X (聂佩显), Sun Y (孙滢), et al. Response of water status indicators in apple saplings to drought stress under shelter from rain. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2016, **27** (8): 2459-2466 (in Chinese)
- [12] Chang G-H (常国华), Chen Y-Q (陈映全), Gao T-P (高天鹏), et al. Sprout water potentials and the influencing factors in *Ephedra przewalskii* and *Nitraria tangutorum*. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2015, **35** (2): 385-392 (in Chinese)
- [13] Hu J-C (胡继超), Jiang D (姜东), Cao W-X (曹卫星), et al. Effect of short-term drought on leaf water potential, photosynthesis and dry matter partitioning in paddy rice. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15** (1): 63-67 (in Chinese)
- [14] Coolong T, Snyder J, Warner R, et al. The relationship between soil water potential, environmental factors, and plant moisture status for poblano pepper grown using tensiometer-scheduled irrigation. *International Journal of Vegetable Science*, 2012, **18**: 137-152
- [15] Wang K-P (王克鹏), Zhang R-Z (张仁陟), Dong B (董博), et al. Effect of long-term conservation tillage on soil water regimes and leaf water potential of crops in rainfed areas of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2014, **34** (13): 3752-3761 (in Chinese)
- [16] Yang X-J (杨显基), Du J-H (杜建会), Zhang C-J

- (张楚杰), *et al.* Diurnal variations of water potential and its influencing factors in typical plant communities on coppice dunes of Pingtan Island. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2016, **36**(9): 2614–2619 (in Chinese)
- [17] Moreno-Casasola P. Sand movement as a factor in the distribution of plant communities in a coastal dune system. *Vegetatio*, 1986, **65**: 67–76
- [18] Dong Y-X (董玉祥), Huang D-Q (黄德全), Ma J (马骏). Change of vertical distribution of different sand grain sizes in wind-sand flow at different sites over coastal dune. *Scientia Geographica Sinica* (地理科学), 2010, **30**(3): 391–397 (in Chinese)
- [19] Kim D, Yu KB. A conceptual model of coastal dune ecology synthesizing spatial gradients of vegetation, soil, and geomorphology. *Plant Ecology*, 2009, **202**: 135–148
- [20] Abuodha JOZ, Musila WM, van der Hagen H. Floristic composition and vegetation ecology of the Malindi Bay coastal dune field, Kenya. *Journal of Coastal Conservation*, 2003, **9**: 97–112
- [21] Carranza ML, Acosta ATR, Stanisci A, *et al.* Ecosystem classification for EU habitat distribution assessment in sandy coastal environments: An application in central Italy. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, **140**: 99–107
- [22] Yang X-J (杨显基). Diurnal Variations of Water Potential of Typical Coastal Psammophyte *Spinifex littoreus* and Its Responses of Environmental Stress on Coppice Dunes of Pingtan Island. Master Thesis. Guangzhou: Sun Yat-Sen University, 2016 (in Chinese)
- [23] Kang S-Z (康绍忠), Liu X-M (刘晓明), Xiong Y-Z (熊运章). Theory of Water Transport in Soil-Plant-Atmosphere Continuum and Its Application. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1994 (in Chinese)
- [24] Faria T, Silvério D, Breia E, *et al.* Differences in the response of carbon assimilation to summer stress (water deficits, high light and temperature) in four Mediterranean tree species. *Physiologia Plantarum*, 1998, **102**: 419–428
- [25] Zeng F-J (曾凡江), Li X-Y (李向义), Zhang X-M (张希明). Variation characteristics of perennial plant species water relation parameters under extreme arid condition. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2010, **29**(2): 207–214 (in Chinese)
- [26] Du J-H (杜建会), Yan P (严平), E Y-H (俄有浩), *et al.* Influence of heavy rain event on soil water content of *Nitraria tangutorum* Nebkhas in different succession periods. *Bulletin of Soil and Water Conservation* (水土保持通报), 2007, **27**(6): 20–24 (in Chinese)
- [27] Peláez DV, Boo RM. Plant water potential for shrubs in Argentina. *Journal of Range Management*, 1987, **40**: 6–9
- [28] Han D-R (韩德儒), Yang W-B (杨文斌), Yang M-R (杨茂仁). Dynamics and Application of Water Stress in Shrub and Tree Species in Arid and Semiarid Regions. Beijing: China Science and Technology Press, 1996 (in Chinese)
- [29] Yang X-J (杨显基), Du J-H (杜建会), Qin J (秦晶), *et al.* The response of leaf water potential of a typical psammophyte *Spinifex littoreus* to wind erosion, sand burial and sand flow abrasion in coastal area of Pingtan Island. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2017, **36**(5): 1215–1223 (in Chinese)
- [30] Li QH, Xu J, Li HQ, *et al.* Effects of aspect on clonal reproduction and biomass allocation of layering modules of *Nitraria tangutorum* in nebkha dunes. *PLoS One*, 2013, **8**(10): e79927
- [31] Wang L (王林), Feng J-X (冯锦霞), Wang S-X (王双霞), *et al.* The interaction of drought and slope aspect on growth of *Quercus variabilis* and *Platycladus orientalis*. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2013, **33**(8): 2425–2433 (in Chinese)
- [32] Guo L-S (郭连生), Tian Y-L (田有亮). Transpiration rate of coniferous and broadleaf young trees as a function of water potential of their leaves and of environmental factors. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 1992, **12**(1): 47–52 (in Chinese)
- [33] Wang P (王萍), Yin L-J (殷立娟), Li J-D (李建东). Studies on the adaptability and tolerance of *Leymus chinensis* to salinity in salinized grassland in the Songnen Plain. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 1994, **14**(3): 306–311 (in Chinese)
-
- 作者简介 杨显基,男,1990年生,硕士研究生.主要从事植物生理生态研究. E-mail: yangxianji2010@163.com
- 责任编辑 孙菊
-

杨显基,杜建会,秦晶,等. 福建平潭岛海岸不同演化阶段草丛沙堆表面老鼠茅叶水势日变化特征. 应用生态学报, 2017, **28**(10): 3260–3266

Yang X-J, Du J-H, Qin J, *et al.* Diurnal variation characteristics of leaf water potential of *Spinifex littoreus* on the nebkhas in different succession periods on the coast of Pingtan Island, Fujian Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(10): 3260–3266 (in Chinese)