

黄河三角洲芦苇湿地土壤水分安全阈值

谢涛, 杨志峰

(北京师范大学环境学院水环境模拟国家重点实验室, 北京 100087)

摘要: 基于盆栽试验测定了多水分梯度下黄河三角洲芦苇湿地3种生态型芦苇(淡水沼泽芦苇、盐化草甸芦苇和咸水沼泽芦苇)快速生长期叶片的光合-光响应过程, 比较各生态型芦苇适宜的土壤水分条件。结果表明: 在相对含水率为95.6%时, 淡水沼泽芦苇最大净光合速率比渍水条件显著升高($p < 0.05$), 而盐化草甸芦苇和咸水沼泽芦苇这一差异并不显著($p < 0.05$)。不同生态型芦苇净光合速率对土壤水分的变化存在不同的响应阈值。从适宜土壤水分的阈值看, 淡水沼泽芦苇对水分胁迫的耐受能力高于盐化草甸芦苇和咸水沼泽芦苇, 生境盐度差异可能是造成这一差异的重要原因。

关键词: 土壤水分; 光合-光响应; 阈值; 芦苇湿地; 黄河三角洲

中图分类号: Q945.17 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2009)05-0683-06

阈值性是生态需水的重要基本特征, 目前在众多的生态需水计算方法中已经提出了许多安全阈值作为生态需水标准确立的依据。其中水文学和水力学的生态需水计算方法主要从流量和水位角度界定生态合理的水量要求, 但由于对生理和生态学参数关系分析的不足使得研究成果的适用性受到显著影响^[1-4]。以水文过程的生态响应为基础的生境模拟法和整体法等生态需水计算方法, 生态需水阈值的确定标准主要侧重于特定鱼类和无脊椎动物对流量变化的响应^[4-6]。在以栖息地保护为关键目标的湿地生态需水研究中, 揭示湿地典型植被对土壤水分条件的生理响应规律和临界响应阈值成为确定生态需水阈值的关键, 而这方面的研究尚不多见。由于长期对水盐条件适应的结果, 黄河三角洲新生湿地芦苇种群分化出淡水沼泽芦苇、盐化草甸芦苇和咸水沼泽芦苇3种生态型^[7]。过去几十年, 受黄河断流和人为干扰的影响, 生态缺水导致黄河三角洲各生态型的芦苇均有不同程度的退化^[8]。理解芦苇对土壤水分条件的生理响应规律和临界响应阈值对确立芦苇湿地生态需水标准和指导湿地恢复具有重大意义。本研究以黄河三角洲3种生态型芦苇为对象, 通过开展多梯度土壤水分条件下芦苇的光合-光响应特征研究, 提出不同生态型芦苇适宜的土壤水分安全阈值, 为芦苇湿地管理提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 实验设计

2008年4月, 在黄河三角洲国家自然保护区大汶流管理站辖区内, 连同地下根茎一起挖取3种生态型芦苇幼苗。其中淡水沼泽芦苇苗取自芦苇生长旺盛的引黄水渠边; 盐化草甸芦苇苗取自芦苇恢复区内柽柳和芦苇混生的群落内; 咸水沼泽芦苇取自芦苇与盐地碱蓬混生的黄河南岸潮滩。取样时淡水沼泽芦苇、盐化草甸芦苇和咸水沼泽芦苇幼苗平均高度分别为(50 ± 2) cm、(30 ± 2) cm和(20 ± 1) cm。将挖掘的幼苗移栽到底部有孔的塑料花盆中(直径24 cm, 高16 cm)。各种生态型芦苇分别采用各自采样点的混土培养(表1), 每盆装相当于6 g干土量的湿土。

收稿日期: 2008-09-15

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(50625926); 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2006CB403303)

作者简介: 谢涛(1980-), 男, 湖北松滋人, 博士研究生, 主要从事湿地生态需水方面研究。E-mail: xiet1980@163.com

通信作者: 杨志峰, E-mail: zfyang@bnu.edu.cn

培养时将淡水沼泽芦苇花盆放到 10 cm 深的水槽中, 每天早上 7:00~7:30 向水槽中补水, 确保花盆的一半淹没在水面以下。盐化草甸芦苇和咸水沼泽芦苇培养时, 为避免培养过程中盐分的流失, 将塑料花盆底部的小孔封闭起来。每天早上 7:00~7:30 称盆补水一次, 以保证土壤含水量维持在田间持水量附近。灌溉水均来自引黄水渠 (电导率 $EC = 1.38$ mS/cm)。每盆保留一株, 置于透光遮雨棚内培养 30 d 后, 进行水分胁迫处理。采用人为给水和自然耗水相结合的方法, 获取盆栽土壤不同的水分梯度^[9]。首先从盆栽芦苇中选取生长健壮, 大小一致 (淡水沼泽芦苇高 (120 ± 4) cm, 盐化草甸芦苇高 (100 ± 3) cm; 咸水沼泽芦苇高 (80 ± 3) cm) 的芦苇各 5 盆, 淡水沼泽芦苇在保持花盆的一半浸没在水中的情况下进行第一次生理参数测定; 盐化草甸芦苇和咸水沼泽芦苇通过人为灌水, 使盆内土壤处于渍水状态后进行第一次生理参数测定。此后将待测淡水沼泽芦苇从水槽中取出, 同时打开盐化草甸芦苇和咸水沼泽芦苇花盆底部小孔, 均不再灌溉, 通过自然耗水每隔 1~2 d 获得一个土壤水分水平条件。采用美国产 ML2x 型土壤水分探头 (ThetaProbe Soil Moisture Sensor-ML2x) 监测土壤体积含水率 (W_v) 的变化, 同时进行光合-光响应的测定。直到在某一 W_v 水平下, 最大净光合速率 P_m 的测量值低于 $1 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 光合作用基本停止, 测量的相对误差过大, 即停止实验。

表 1 土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical characteristics of the soils

芦苇类型	土壤容重 /(g cm^{-3})	田间持水量 / %	土壤盐度 /(10^{-3})
淡水沼泽芦苇 (FWSR)	1.36	28.4	3.7
盐化草甸芦苇 (SMR)	1.37	27.4	7.6
咸水沼泽芦苇 (SWSR)	1.37	30.0	16.2

首先从盆栽芦苇中选取生长健壮, 大小一致 (淡水沼泽芦苇高 (120 ± 4) cm, 盐化草甸芦苇高 (100 ± 3) cm; 咸水沼泽芦苇高 (80 ± 3) cm) 的芦苇各 5 盆, 淡水沼泽芦苇在保持花盆的一半浸没在水中的情况下进行第一次生理参数测定; 盐化草甸芦苇和咸水沼泽芦苇通过人为灌水, 使盆内土壤处于渍水状态后进行第一次生理参数测定。此后将待测淡水沼泽芦苇从水槽中取出, 同时打开盐化草甸芦苇和咸水沼泽芦苇花盆底部小孔, 均不再灌溉, 通过自然耗水每隔 1~2 d 获得一个土壤水分水平条件。采用美国产 ML2x 型土壤水分探头 (ThetaProbe Soil Moisture Sensor-ML2x) 监测土壤体积含水率 (W_v) 的变化, 同时进行光合-光响应的测定。直到在某一 W_v 水平下, 最大净光合速率 P_m 的测量值低于 $1 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 光合作用基本停止, 测量的相对误差过大, 即停止实验。

1.2 光合作用-光响应过程测定

应用 LF6400 便携式光合作用系统 (Li-Cor, USA) 的自动光曲线程序测定试验植株顶部从上至下第 3 片全展叶中部的光合-光响应过程。为了尽量减少外界光照波动所造成的影响, 并避开“午休”时段, 测定时间选择在完全晴朗天气下的 8:30~11:30 和 3:00~5:00 进行。测定时, 使用大气 CO_2 浓度 $(390 \pm 10 \mu\text{mol}/\text{mol})$, 叶面温度控制在 28 ± 1 , 光强由 LF6400 红蓝 2BLED 光源进行自动控制, 光合有效辐射从高到低共设置 2000、1500、1200、900、700、500、400、300、200、100、80、50 和 $20 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 13 个梯度, 测量指标包括叶片净光合速率 ($P_n, \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) 和蒸腾速率 ($T_r, \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)。测量前叶片在 $2000 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的光合有效辐射下活化 30 min, 每个梯度下控制测定时间为 120~180 s。

1.3 数据分析方法

描述光合-光响应曲线的经验公式包括非直角双曲线模型^[10]、直角双曲线模型^[11]以及二次模型^[12]。通过比较发现用直角双曲线模型进行非线性回归分析其模拟方程的决定系数 R^2 均大于 0.96, 具有最优的拟合效果, 故采用该模型进行光响应曲线的拟合, 其方程为

$$P_n = \frac{\alpha \cdot P_a \cdot P_m}{\alpha \cdot P_a + P_m} - R_d \quad (1)$$

式中 P_n 为净光合速率, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; α 为光响应曲线的初始斜率, 即表观光合量子效率; P_a 为光合有效辐射, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; P_m 为一定 CO_2 浓度下最大净光合速率, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; R_d 为暗呼吸速率, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。在式 (1) 中, 令 $P_n = 0$, 可求得光补偿点 $I_c, \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。即

$$I_c = \frac{R_d P_m}{(P_m - R_d)} \quad (2)$$

参考邹种楠等^[13]计算光饱和点的方法, 根据淡水沼泽芦苇的特点, 用 P_n 达到最大净光合速率的 70% 时的光合有效辐射 P_a 来估计光饱和点 $I_s, \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 计算方法为

$$I_s = \frac{P_m(0.70 P_m + R_d)}{(0.30 P_m - R_d)} \quad (3)$$

同时, 计算叶片水分利用效率 U_w 和瞬时光能利用效率 U_L 。

$$U_w = P_n / T_r \quad U_L = P_n / P_a \quad (4)$$

式中 T_r 为蒸腾速率, $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

通过非线性回归来拟合光合-光响应模型, 并估计模型参数。用单因素方差分析 (One-Way ANOVA) 和最小显著差异法 (LSD) 比较不同数据组间的差异, 并以 P_n 、 T_r 、 U_w 和 U_L 4 个指标的均值为变量, 用 K-均值聚类分析法 (KMeans Cluster Analysis) 对各个土壤水分点进行聚类。以上分析均用 SPSS13.0 完成。

2 结 果

2.1 不同土壤水分条件下各生态型芦苇光合-光响应过程

不同土壤水分条件下各生态型芦苇叶片的光响应过程基本相似 (图 1), 即随光合有效辐射 P_a 升高, 初始阶段叶片净光合速率 P_n 上升较快; 当 P_a 高于 $300 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 后, P_n 上升变缓; 当 P_a 达到一定数值时 (光饱和点), $P_n \sim P_a$ 曲线渐趋平缓, 出现光饱和现象。

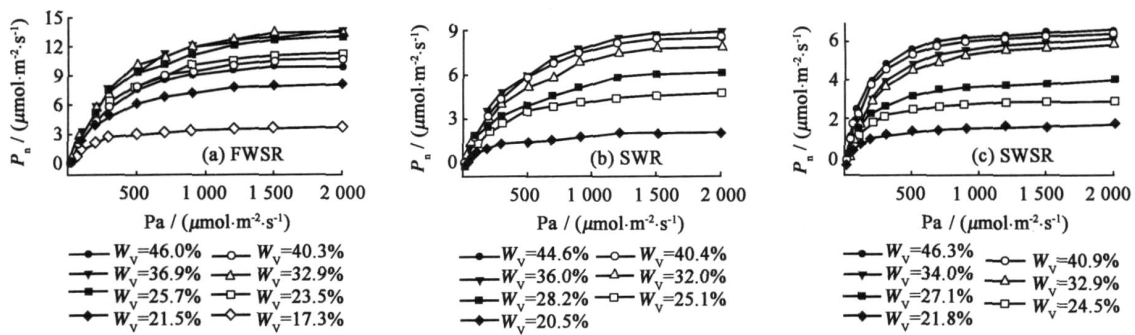


图 1 不同土壤体积含水率 (W_v) 下 3 种生态型芦苇叶片光合 (P_n) 光响应曲线 (均值 \pm 标准差, $n=5$)

Fig. 1 Light responses to net photosynthetic rate (P_n) of the leaves of three ecotypes of reeds under different volumetric soil water contents (W_v) (mean \pm S. D., $n=5$)

由表 2 分析各生态型芦苇光合-光响应特征参数在不同土壤水分条件下的差异, 淡水沼泽芦苇在水分下降的初始阶段最大净光合速率 P_m 有显著 ($P < 0.05$) 的上升, 并在土壤体积含水率 $W_v < 25.7\%$ 以后 P_m 开始显著下降 ($P < 0.05$)。对于盐化草甸芦苇和咸水沼泽芦苇而言, 土壤水分从渍水状态下降到田间持水量附近的过程中, P_m 变化不显著 ($P < 0.05$)。总体上各生态型芦苇的表现光合量子效率随着土壤含水率的下降呈下降趋势。在低土壤水分水平下, 各生态型芦苇的暗呼吸速率 R_d 均有显著变低的趋势 ($P < 0.05$)。实验条件下淡水沼泽芦苇、盐化草甸芦苇和咸水沼泽芦苇的 I_c 分别在 $21 \sim 28 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $17 \sim 29 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 $22 \sim 36 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的范围内变化, 均介于阴性植物 ($I_c < 20 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) 与阳性植物 (I_c 为 $50 \sim 100 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) 之间^[14]; 光饱和点 I_s 分别在 $733 \sim 1116 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $875 \sim 1218 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 $713 \sim 1286 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 范围内变化, 表明各种生态型芦苇均有喜光特性。 I_c 和 I_s 受水分条件影响的变化趋势并不明显。

表 2 3 种生态型芦苇不同水分处理光合-光响应曲线特征参数 (均值 \pm 标准差) ($n=5$)

Table 2 Parameters (mean \pm S. D.) for the light response curve under water stress treatment of the three ecotypes of reeds ($n=5$)

生态型	W_v / %	W_v / %	$P_m / (\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$\phi / (\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1})$	$R_d / (\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$I_c / (\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$I_s / (\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$
FWSR	46.0	119.2	12.97 \pm 0.40d	0.053 \pm 0.012a	1.21 \pm 0.41ab	25 \pm 4a	961 \pm 28ab
	40.3	104.4	13.55 \pm 0.40cd	0.053 \pm 0.003a	1.13 \pm 0.14ab	23 \pm 2a	923 \pm 28ab
	36.9	95.6	17.75 \pm 0.81a	0.062 \pm 0.020a	1.45 \pm 0.58a	25 \pm 4a	1080 \pm 146a
	32.9	85.2	17.47 \pm 0.16ab	0.058 \pm 0.003a	1.34 \pm 0.10a	25 \pm 1a	1055 \pm 17a
	25.7	66.6	16.82 \pm 0.79b	0.057 \pm 0.012a	1.47 \pm 0.50a	28 \pm 5a	1116 \pm 24a
	23.5	60.9	14.31 \pm 0.26c	0.049 \pm 0.004ab	1.14 \pm 0.19ab	25 \pm 3a	1041 \pm 21ab
	21.5	55.7	10.19 \pm 0.40e	0.042 \pm 0.005b	0.77 \pm 0.39b	21 \pm 12a	877 \pm 229b
	17.3	44.8	4.62 \pm 0.47f	0.035 \pm 0.005b	0.68 \pm 0.09b	23 \pm 3a	733 \pm 86b
	14.8	38.3	—	—	—	—	—

(续表 2)

生态型	$W_v/\%$	$W_r/\%$	$P_n/(\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1})$	$T_r/(\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1})$	$R_d/(\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1})$	$I_v/(\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1})$	$I_r/(\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1})$
SMR	44.6	118.6	11.28 ±0.28a	0.030 ±0.006a	0.63 ±0.12a	22 ±4b	1179 ±215a
	40.4	107.4	11.25 ±0.27a	0.030 ±0.006a	0.62 ±0.14a	22 ±5b	1168 ±174a
	36.0	95.7	11.40 ±0.13a	0.032 ±0.005a	0.52 ±0.17b	17 ±3b	1070 ±121ab
	32.0	85.1	10.42 ±0.51b	0.029 ±0.004a	0.76 ±0.05a	28 ±3a	1218 ±116a
	28.2	74.7	7.91 ±0.62c	0.024 ±0.002ab	0.60 ±0.06ab	27 ±4a	1154 ±96a
	25.1	66.5	5.85 ±0.45d	0.025 ±0.003ab	0.53 ±0.04b	23 ±5ab	875 ±91b
	20.5	54.5	2.63 ±0.28e	0.017 ±0.003b	0.42 ±0.08b	29 ±5a	974 ±171ab
	17.7	47.1	—	—	—	—	—
	46.3	112.7	8.42 ±0.15a	0.069 ±0.018a	1.26 ±0.15a	22 ±3c	713 ±75b
	40.0	97.4	8.25 ±0.12a	0.061 ±0.004b	1.27 ±0.15a	25 ±2bc	797 ±67b
SWSR	34.0	82.8	8.22 ±0.17a	0.046 ±0.008b	1.36 ±0.22a	36 ±5a	1176 ±44a
	32.9	80.1	7.67 ±0.41a	0.045 ±0.010b	1.13 ±0.30a	29 ±6b	971 ±153ab
	27.1	66.0	5.40 ±1.16b	0.040 ±0.002b	1.07 ±0.12ab	34 ±4ab	1286 ±276a
	24.5	59.6	3.94 ±0.39c	0.038 ±0.003b	0.81 ±0.03b	27 ±4bc	1014 ±157ab
	21.8	53.1	2.15 ±0.35d	0.021 ±0.004c	0.46 ±0.05c	29 ±4b	1136 ±46a
	20.3	49.4	—	—	—	—	—

注: W_r 表示土壤相对含水率; 不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著; “—”表示此水分条件下 $P_n < 1 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 停止测量。

2.2 各生态型芦苇适宜土壤水分范围探讨

依据每一次光响应过程中测量的净光合速率 P_n 、蒸腾速率 T_r 、水分利用效率 U_w 、光能利用效率 U_L 4 个光合生理指标的均值, 对每种生态型芦苇的各个土壤湿度点进行聚类分析, 当聚类数为 3 时, 结果见表 3。从聚类结果看, 类的土壤含水率最高、类次之, 类最低。类型间比较结果表明, 除了咸水沼泽芦苇 T_r 在类和类之间的差异不显著外 ($p > 0.01$), 各生态型芦苇 P_n 、 T_r 、 U_w 、 U_L 在各类群间差异均非常显著 ($p < 0.01$), 其中 U_w 均在类水分类群中最高。3 个水分类群分别对应 3 种生理状态, 类为高土壤含水率情况, 具有高光合能力、高蒸腾能力和高光能利用效率; 类为中等土壤含水率情况, 具有中等程度光合能力、蒸腾能力和光能利用效率; 而类处于低土壤含水率情况, 具有低光合能力、低蒸腾能力和低光能利用效率。从各类群的水分范围看, 淡水沼泽芦苇维持正常生长(具有较高 P_n 和 U_L) 的土壤体积含水率 (W_v) 在 25.7% 以上 ($W_r > 66.6\%$), 正常生长所允许的最低 W_v 为 21.5% ($W_r = 55.7\%$) 左右; 盐化草甸芦苇维持正常生长的 W_v 在 32.0% 以上 ($W_r > 85.1\%$) 范围内, 正常生长所允许的最低 W_v 为 25.1% ($W_r = 66.5\%$) 左右; 咸水沼泽芦苇维持正常生长的 W_v 在 34.0% 以上 ($W_r > 82.8\%$), 正常生长所允许的最低 W_v 为 27.1% ($W_r = 66.0\%$) 左右。

表 3 淡水沼泽芦苇 P_n 、 T_r 、 U_w 和 U_L 在各土壤水分类群间的差异

Table 3 Difference of P_n , T_r , U_w and U_L among the different water content groups of the three ecotypes of reeds

生态型	类群	$W_v/\%$	类平均(均值 ±标准差)			
			$P_n/(\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1})$	$T_r/(\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1})$	$U_w/(\mu\text{mol mmol}^{-1})$	U_L
FWSR		46.0、40.3、36.9、32.9、25.7	6.85 ±0.75A	2.43 ±0.27A	2.44 ±0.20A	0.015 ±0.013A
		23.5、21.5	5.53 ±0.85B	0.84 ±0.05B	5.59 ±0.63B	0.012 ±0.002B
		17.3	2.31 ±0.16C	0.51 ±0.02C	4.17 ±0.13C	0.006 ±0.001C
SMR		44.6、40.4、36.0、32.0	4.64 ±0.35A	1.19 ±0.16A	3.35 ±0.32A	0.010 ±0.002A
		28.2、25.1	3.01 ±0.38B	0.45 ±0.04B	5.95 ±0.82B	0.006 ±0.0001B
		20.5	1.15 ±0.15C	0.35 ±0.03C	3.27 ±0.41C	0.003 ±0.001C
SWSR		46.3、40.0、34.0	3.95 ±0.34A	0.97 ±0.13A	3.62 ±0.56A	0.010 ±0.003A
		32.9、27.1	2.96 ±0.71B	0.36 ±0.05B	7.24 ±1.76B	0.006 ±0.002B
		24.5	1.45 ±0.50C	0.32 ±0.06B	4.25 ±1.43C	0.004 ±0.001C

注: 不同大写字母表示在 0.01 水平上差异显著。

3 结 论

不同生态型芦苇光合-光响应特征参数对水分条件存在不同的响应规律。淡水沼泽芦苇的最大净光和速率 P_m 在 $W_v = 36.9\%$ (即 $W_r = 95.6\%$) 时比渍水条件显著升高 ($p < 0.05$)。可见尽管淡水沼泽芦苇是一种常见的挺水植物,对水淹有很好的适应性,但从 P_m 看渍水条件并不是其生理状态最好的条件。Saltmarsh 等^[15]对土壤失水过程中芦苇气体交换特征的研究中也曾得到类似的结论。而对盐化草甸芦苇和咸水沼泽芦苇而言,这一差异并不显著 ($p > 0.05$)。这可能与生态型的分化有关,例如咸水沼泽芦苇生长在潮滩上,对土壤常年处于渍水状态具有很好的适应性。但具体原因还有待于进一步深入研究加以揭示。总体上各生态型芦苇的表观光合量子效率随着土壤含水率的下降呈下降趋势。在低土壤水分水平下,各生态型芦苇的暗呼吸速率 R_d 均有显著变低的趋势 ($p < 0.05$),这可能是芦苇对干旱胁迫的一种适应,即通过减少呼吸作用对光合产物的消耗,以利于干物质的积累。水分利用效率 U_w 越高表明固定单位质量的 CO_2 所需要的水量越小,植物耐旱生产力越高。3种生态型芦苇的 U_w 均在Ⅲ类水分类群最高,表明低土壤水分条件下各种生态型芦苇均能通过大幅提高 U_w ,以维持较高的光合能力。

各生态型芦苇净光合速率对土壤水分的变化均有明显的响应阈值。淡水沼泽芦苇、盐化草甸芦苇和咸水沼泽芦苇生长适宜的土壤水分(体积含水率)下限分别为 25.7%、32.0%和 34.0%,最低土壤水分(体积含水率)下限分别为 21.5%、25.1%和 27.1%。从土壤水分的阈值看,淡水沼泽芦苇对水分胁迫的耐受能力高于盐化草甸芦苇和咸水沼泽芦苇,生境盐度差异可能是造成这一差异的原因。

一方面河口区芦苇生态型的分化是对水盐环境长期适应的结果,这种适应使得不同生态型芦苇对于水分条件的生理需求存在差异。高盐生境芦苇的恢复和维护可能需要确立相对高的生态需水标准。另一方面,河口区芦苇湿地的水分条件和盐分条件是密不可分的,考虑这一区域湿地的生态需水问题,应重视水盐条件耦合作用的生态效应和水盐运移规律的综合研究,这也是将生态需水研究引向深入的客观要求。

参考文献:

- [1] JOWETT I G. Instream flow methods: A comparison of approaches[J]. Regulated Rivers: Research & Management, 1997, 13(2): 115-127.
- [2] 杨志峰,张远.河道生态环境需水研究方法比较[J].水动力学研究与进展,2003,18(3):294-301. (YANG Zhi-feng, ZHANG Yuan. Comparison of methods for ecological and environmental flow in river channels[J]. Journal of Hydrodynamics, 2003, 18(3): 294-301. (in Chinese))
- [3] 钟华平,刘恒,耿雷华,等.河道内生态需水估算方法及其评述[J].水科学进展,2006,17(3):430-434. (ZHONG Huar-ping, LIU Heng, GEN Lei-hua, et al. Review of assessment methods for instream ecological flow requirements[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(3): 430-434. (in Chinese))
- [4] THARME R E. A global perspective on environmental flow assessment: Emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers[J]. River Research and Applications, 2003, 19(5/6): 397-441.
- [5] 陈敏建,丰华丽,王立群,等.适宜生态流量计算方法研究[J].水科学进展,2007,18(5):745-750. (CHEN Min-jian, FENG Huar-li, WANG Li-qun, et al. Calculation methods for appropriate ecological flow[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(5): 745-750. (in Chinese))
- [6] HUCKSTORF V, LEWIN W C, WOLTER C. Environmental flow methodologies to protect fisheries resources in human-modified large lowland rivers[J]. River Research and Applications, 2008, 24(5): 519-527.
- [7] 陈为峰.黄河三角洲新生湿地生态过程研究[D].泰安:山东农业大学,2005:35-36. (CHEN Wei-feng. Ecological process in the new-born wetlands of the Yellow River Delta[D]. Tai an: Shangdong Agriculture University, 2005: 35-36. (in Chinese))
- [8] 唐娜,崔保山,赵欣胜.黄河三角洲芦苇湿地的恢复[J].生态学报,2006,26(8):2616-2624. (TANG Na, CUI Bao-shan, ZHAO Xin-sheng. The restoration of reed (*Phragmites australis*) wetland in the Yellow River Delta[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(8): 2616-

2624. (in Chinese))
- [9] 张淑勇, 周泽福, 夏江宝, 等. 不同土壤水分条件下小叶扶芳藤叶片光合作用对光的响应[J]. 西北植物学报, 2007, 27(12): 2514-2521. (ZHANG Shu-yong, ZHOU Ze-fu, XIA Jiang-bao, et al. The responses of *Euonymus fortunei* var *radicans* Sieb Leaf photosynthesis to light in different soil moisture[J]. Acta Botanica Boreal-Occidentalia Sinica, 2007, 27(12): 2514-2521. (in Chinese))
- [10] LESSMANN J M, BRIX H, BAUER V, et al. Effect of climatic gradients on the photosynthetic responses of four *Phragmites australis* populations[J]. Aquatic Botany, 2001, 69(2/3/4):109-126.
- [11] 赵广琦, 张利权, 梁霞. 芦苇与入侵植物互花米草的光合特性比较[J]. 生态学报, 2005, 25(7):1604-1611. (ZHAO Guang-qi, ZHANG Li-quan, LIANG Xia. A comparison of photosynthetic characteristics between an invasive plant *Spartina alterniflora* and an indigenous plant *Phragmites australis*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(7):1604-1611. (in Chinese))
- [12] 付为国, 李萍萍, 卞新民, 等. 镇江北固山湿地芦苇光合日变化的研究[J]. 西北植物学报, 2006, 26(3):496-501. (FU Wei-guo, LI Ping-ping, BIAN Xin-min, et al. Diurnal photosynthetic changes of *Phragmites communis* in the wetland lying in Beigushan Mountain of Zhengjian prefecture[J]. Acta Botanica Boreal-Occidentalia Sinica, 2006, 26(3):496-501. (in Chinese))
- [13] 邹种楠, 齐华, 孟显华, 等. 不同燕麦品种灌浆初期光响应曲线研究[J]. 麦类作物学报, 2008, 28(2):287-290. (ZOU Zhong-nan, QI Hua, MENG Xian-hua, et al. Study on light-response curve of photosynthesis of different oat varieties at early grain filling stage [J]. Journal of Triticeae Crops, 2008, 28(2):287-290. (in Chinese))
- [14] 夏江宝, 张光灿, 刘刚, 等. 不同土壤水分条件下紫藤叶片生理参数的光响应[J]. 应用生态学报, 2007, 18(1):30-34. (XIA Jiang-bao, ZHANG Guang-chan, LIU Gang, et al. Light response of *Wisteria sinensis* leaves physiological parameters under different soil moisture conditions[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(1):30-34. (in Chinese))
- [15] SALTMARSH A, MAUCHAMP A, RAMBAL S. Contrasted effects of water limitation on leaf functions and growth of two emergent co-occurring plant species, *Cladium mariscus* and *Phragmites australis*[J]. Aquatic Botany, 2006, 84(3):191-198.

Safety threshold of soil water content for reed wetland in Yellow River Delta^{*}

XIE Tao, YANG Zhi-feng

(State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: According to the different soil water contents, the light response of photosynthesis of potted three ecotypes of reeds (fresh water swamp reeds, FWSR, salt meadow reeds, SMR, and salty water swamp reeds, SWAR) collected from the reed wetland in Yellow River Delta are measured, and their moderate soil water content ranges during the fast growing period are compared, so as to provide the evidence for the establishment of the ecological water requirement standards in reed wetland. The results show that the maximum net photosynthesis rate of FWSR, when the soil relative water content is 95.6%, is significantly higher than that in the waterlogged condition ($p < 0.05$). However, for SMR and SWAR this difference is not significant ($p > 0.05$). The net photosynthetic rates of the three ecotypes of reeds have different response thresholds to the alteration of soil water content. And the tolerance of FWSR to soil water stress is stronger than the other two ecotypes, which may be mainly due to the different soil salinities in their habitats.

Key words: soil water content; light response of photosynthesis; threshold; reed wetland; Yellow River Delta

* The study is financially supported by the National Science Fund for Distinguished Young Scholar of China (No. 50625926) and the National Basic Research Program of China (No. 2006CB403303).