

不同土壤类型对芦苇生长及光合特征的影响

夏贵菊¹, 何彤慧^{1*}, 赵永全¹, 邓鑫¹, 郭宏玲², 段志刚²

(1 宁夏大学 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021; 2 宁夏湿地保护管理中心, 银川 750021)

摘要:以宁夏平原湿地恢复中常用的几种土壤进行芦苇栽培控制实验, 获取芦苇在不同土壤环境中生长及光合作用特征, 探讨影响芦苇正常生长发育的主要土壤因子和适宜土壤类型。结果表明: (1) 不同土壤环境条件下芦苇的多度、株高、叶面积、株径、生物量存在显著差异, 且各生态和生长特征值均为草炭土最大。 (2) 芦苇的光合参数 P_n 、 G_s 、 T_r 表现出相同的变化趋势, 即峰值出现在 10:00, 具有明显的“午休”现象, 但 C_i 值的变化趋势则相反。 (3) 不同土壤类型上芦苇的光合效应表现为草炭土 > 沼泽土 > 原位土 > 灰钙土 > 沙土, 显示草炭土中芦苇的光合效应最强。 (4) 土壤因子与芦苇的生物量、净光合速率的通路分析及逐步回归分析结果表明, 土壤有机碳含量 (SOC)、全氮含量 (TN) 是影响芦苇生物量的决定因子; 影响芦苇净光合速率的决定因子为土壤全氮含量 (TN)、有机碳含量 (SOC) 和土壤全磷含量 (TP), 土壤全盐含量 (TS) 为限制因子。 (5) 芦苇属于典型的水生植物, 对水分的要求较高, 草炭土富含养分, 且保水能力特别强, 是最适合芦苇生长的土壤类型。

关键词: 土壤类型; 芦苇; 生长; 光合作用

中图分类号: Q945.79

文献标志码: A

Influence of Different Soil Types on Reed Growth and Photosynthesis Characteristics

XIA Guiju¹, HE Tonghui^{1*}, ZHAO Yongquan¹, DENG Xin¹, GUO Hongling², DUAN Zhigang²

(1 Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in North-western China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2 Ningxia Wetland Protection Management Center, Yinchuan 750021, China)

Abstract: By selecting several control experiments of cultivation of reed from several different commonly used soils in restoring Ningxia Plain wetland, we obtained the performance characteristics of reed growth and photosynthesis to different soil environments. The results showed that: (1) Under different soil conditions, there were significant differences in plant height, leaf area, plant diameter, biomass, and the value of each ecological characteristics of peat soil organisms are the largest. (2) Reed photosynthetic parameters P_n , G_s , T_r showed the same trend, namely peak at 10:00, with the obvious ‘lunch break’ phenomenon, the changes of C_i value is the opposite. The effect on the photosynthetic performance of different types of soil reed is peat soil > swamp soil > situ soil > sierozem > sand, and it displays the strongest effects on photosynthesis reed peat soil. (4) By the path analysis and stepwise regression analysis of the reed biomass and soil factors and net photosynthetic rate P_n , the results showed that: soil SOC and soil TN determined reed biomass, and is the most important factor. The determined factor to affect reed net photosynthetic rate is soil TN, soil SOC and soil TP, while TS is the limiting factor. (5) Reed is a typical aquatic plant, higher water requirement, peat soil is nutrient and its water conservation is particularly high, and therefore, peat soil is

收稿日期: 2013-12-11; 修改稿收到日期: 2014-05-14

基金项目: 国家自然科学基金 (41361095); 宁夏财政补助 2012 年林业科技专项

作者简介: 夏贵菊 (1988—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事恢复生态学研究。E-mail: 584814420@qq.com

* 通信作者: 何彤慧, 教授, 主要从事生态系统监测评估、环境变化和湿地生态恢复方面的研究。E-mail: hetonghui@163.com

the most suitable soil type for reed growth.

Key words: soil type; reed; growth; photosynthesis

芦苇(*Phragmites australis*)是禾本科芦苇属多年生草本植物,分布于温带和热带地区。其茎秆直立,高约1~3 m,地下有十分发达的匍匐根状茎,具有很强的营养繁殖能力,在自然界的生态分布幅度很广,而且易形成茂密的单一优势群落。芦苇广泛用于人工湿地的水质净化,能吸附并富集重金属和一些有毒有害物质^[1],并具有大量富积滋育低等植物、浮游生物和软体动物的作用;在干旱区素有“第二森林”之称,具有防止土壤沙化、降低风速等生态效益^[2],并具备洪排涝功能^[3];芦苇含大量蛋白质和糖分,为优良饲料,也是造纸和人造丝、人造棉的上好原料,因此具有很高的生态、经济及景观价值。

近年来,宁夏平原湿地恢复成效显著,湿地面积达到国土面积的16.3%,但是湿地中广泛分布的芦苇群落却出现了明显的退化,表现为芦苇植株的矮化、叶片缩小、茎秆变细、生活力变差、萌发率下降等,多度、盖度、密度、生物量等生态学特征也显著降低。这种情形在近年来经过大规模整修的各级重点湿地尤为明显,如国家级湿地公园阅海的芦苇植被就以每年近10%的速度消失。目前有关芦苇生长影响因素的研究主要集中在水深、水质等方面^[4-7],对不同土壤类型对芦苇生长影响的研究还较少,但是调查发现,整修后的芦苇湿地原有的草炭土层和原位土层多被清除,新的湖底土层多为残积的沼泽土或原位的沙土、地带性土壤灰钙土。本实验选取宁夏平原湿地修复中常见的5类土壤进行芦苇栽培控制实验,研究其生长和光合性质与土壤特征的关系,为芦苇湿地科学修复提供技术支持。

1 材料和方法

1.1 实验区概况

栽培实验用地位于宁夏回族自治区银川市。银川市属中温带大陆性气候,年平均气温8.5℃,日温差12~15℃,年平均日照时数2 800~3 000 h,是中国太阳辐射和日照时数最多的地区之一。年平均降水量200 mm左右,无霜期约185 d。主要气候特点是:四季分明、春迟夏短、秋早冬长,昼夜温差大。

1.2 材料培养

芦苇主要采用其地下根茎繁殖。实验于2013年3月份从银川市七子莲湖挖取芦苇地下根茎,选择几种不同质地的土壤,分别置于规格为45 cm

(长)×30 cm(宽)×25 cm(高)的透明塑料盒中,在盒子的侧面贴上带有刻度的坐标纸制纸条,每个盒子中的土层厚度约为8 cm。再选取大小均匀、茎节上萌蘖芽基本相等的4~5根地下根茎埋于土壤中。土壤类型主要包括原位土、沼泽土、灰钙土、草炭土、沙土,每组处理重复3次,每隔1~2 d补水1次(统一为机井地下水),补水量以淹没土层为限。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 土壤理化性质 野外采土时留足土壤样品带回实验室避光晾干混匀研磨后进行理化性质分析。其中,土壤电导率(DS)含量用电导率仪测定;土壤全盐(TS)由电导率转换而得;土壤pH值用pH计测定;全氮(TN)含量采用凯氏定氮法测定;有机质(SOM)含量用重铬酸钾容量法测定;进而再转换为土壤有机碳(SOC);全钾(TK)含量用氢氧化钠熔融-火焰光度计法测定;全磷(TP)含量用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法测定;速效氮(AN)含量用碱解扩散法测定;速效磷(AP)含量用碳酸氢钠熔融-钼蓝比色法测定^[8]。

1.3.2 芦苇生态指标 每2周统计芦苇的多度、盖度、高度、展叶数、节间数、株径、生活相等,并记录盒子内其他植物的状况。

1.3.3 芦苇生长指标 在芦苇生长的旺盛季(7月中旬),采用典型采样法对芦苇植株进行采样,带回实验室做后续的相关测定。在实验室使用电子天平称取植株鲜重;摘取芦苇叶片,然后测量其叶长、叶宽;运用扫描仪对植物叶片进行扫描,然后用软件DT-scan计算叶面积;用电子游标卡尺测定样品基部直径,得到芦苇平均株径;将样品的茎和叶分别装入锡箔纸袋,放入烘箱65℃烘干至恒重,得出每个盒子中芦苇的总干重、叶干重以及茎干重。

1.3.4 芦苇光合指标 在7月中旬选择一个天气晴朗的日子,取长势相近的芦苇植株的顶端向下第3片充分展开叶,尽可能保持叶片在植株上的自然受光态势,利用CIRAS-2光合测定分析仪(美国PP SYSTEMS公司生产)测定净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、胞间CO₂浓度(C_i)等气体交换参数,测定时间在8:00~14:00,重复3次。

1.4 数据处理

用Excel 2007对数据进行统计分析并绘图,用SPSS 17.0对数据进行单因素方差分析和回归分析。

2 结果与分析

2.1 实验土壤类型及其理化性质

5 种实验土壤类型中,原位土是本实验全部芦苇根茎采挖处的土壤,相当于潮土,属于河湖边缘干湿交替环境下发育的土壤;沼泽土是发育于长期积水并生长喜湿植物的低洼地土壤;灰钙土是暖温带荒漠草原区弱淋溶的干旱土;草炭土是一种特殊的腐殖质土,它是由地表沼泽环境中的植物遗体,经氧化和部分分解作用而堆积的高孔隙比、高含水量、高透水性、高有机质的特殊土^[9],本试验的草炭土是芦苇的须根系残体在土壤中积累而成,有机质成分高达 70% 以上;沙土采于黄河滩地,土壤通气性好、透水性强,保水性差,营养物质、有机物质及部分无机物质贫乏^[10]。

从上述土壤的理化性质测定结果及方差分析(表 1)可以看出,土壤有机碳含量、土壤速效氮含量、全盐含量的大小顺序都为草炭土>沼泽土>原位土>沙土>灰钙土,土壤有机碳含量、土壤速效氮含量除了灰钙土和沙土之间没有显著差异外,在其他土壤类型之间都存在极显著差异($P<0.01$)。全

盐含量在 5 种土壤类型之间都存在极显著差异。

2.2 不同土壤类型下芦苇生长生态特征的变化

由表 2 可知,不同类型土壤上芦苇的多度表现为原位土>草炭土>沼泽土>灰钙土>沙土,但原位土的芦苇多度与草炭土无显著差异($P>0.05$),而与沼泽土、灰钙土、沙土的多度都有显著差异($P<0.05$);不同土壤类型上芦苇的株高为草炭土>原位土>沼泽土>灰钙土>沙土,且草炭土的芦苇株高与其他 4 种土壤的芦苇株高均差异极显著($P<0.01$);芦苇叶面积表现为草炭土>沼泽土>沙土>原位土>灰钙土,且在不同土壤类型之间都存在极显著差异($P<0.01$);芦苇的株径在不同土壤类型下表现为草炭土>沼泽土>原位土>灰钙土>沙土,而草炭土的芦苇株径与原位土和沼泽土之间差异不显著($P>0.05$),而与沙土和灰钙土差异极显著($P<0.01$);不同土壤类型上芦苇的生物量为草炭土>沼泽土>原位土>灰钙土>沙土,其中的草炭土芦苇生物量与其他土壤类型间都有显著差异,其余土壤类型间的生物量之间均没有显著差异。芦苇的展叶数和节间数均表现为灰钙土>草炭土>沼泽土>沙土>原位土,但在不同土壤类型间差异

表 1 同土壤类型的理化性质

Table 1 Chemical properties of different soil types

土壤理化指标 Physical and chemical property of soil	原位土 <i>In situ</i> soil	沼泽土 Bog soil	灰钙土 Sierozem	草炭土 Trufy soil	沙土 Sandy soil
pH	8.30±0.019d	8.64±0.015a	8.53±0.007b	7.86±0.015e	8.39±0.006c
电导率 DS	1 051.33±3.180c	1 781.00±48.030b	183.67±1.200e	3 963.33±4.410a	402.33±1.200d
全盐 TS	2.57±0.007c	4.29±0.110b	0.53±0.003e	9.44±0.012a	1.05±0.003d
有机碳 SOC	5.85±0.790c	9.54±0.210b	1.95±0.630d	26.55±1.760a	3.32±0.160d
全氮 TN	1.37±0.026b	1.55±0.046b	1.48±0.035b	9.43±0.480a	0.64±0.320c
速效氮 AN	27.36±0.270c	57.68±3.950b	14.47±0.240d	71.93±0.670a	18.88±0.360d
全磷 TP	5.26±0.190b	3.05±0.050d	3.89±0.130c	9.24±0.110a	9.32±0.070a
速效磷 AP	0.76±0.035b	1.18±0.080a	1.11±0.060a	0.87±0.035b	1.07±0.038a

注:同行不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

Note: The different letters within same line mean significant difference at 0.05 level.

表 2 不同土壤类型的芦苇生物生态特征变化

Table 2 Changes of reed biological ecological characteristics with different soil types

土壤类型 Soil type	多度 Abundance /plant	株高 Plant height /cm	展叶数 Exhibition leaf number	节间数 Internode number	叶面积 Leaf area /cm ²	株径 Stem diameter /mm	生物量 Biomass /g
沼泽土 Bog soil	21±0.58ab	84.67±2.96c	10.33±1.20a	10.33±1.20a	3 518.50±123.87b	3.71±0.14a	1.83±0.38b
沙土 Sandy soil	11±1.20c	77.33±1.76c	10.00±1.00a	11.33±0.88a	2 483.60±9.20c	2.85±0.16b	1.27±0.26b
灰钙土 Sierozem	20±1.76b	76.33±4.10c	11.33±1.33a	12.67±1.20a	145.57±18.74e	2.67±0.27b	1.35±0.19b
原位土 <i>In situ</i> soil	31±1.45a	97.00±1.52b	8.67±1.20a	11.33±1.33a	1 638.87±49.08d	3.63±0.05a	1.75±0.16b
草炭土 Trufy soil	27±5.00a	151.00±1.53a	10.33±0.33a	12.33±0.48a	10 576.33±198.32a	4.36±0.04a	3.49±0.53a

注:同列不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

Note: The different letters within the same column mean significant difference at 0.05 level.

不显著($P>0.05$),受土壤类型的影响不大。以上结果说明芦苇多度、株高、叶面积、株径和生物量受土壤类型的影响较大,并均以草炭土上的数值较大;而芦苇的展叶数和节间数是生态可塑性较小的生长特征,土壤环境的变化对其影响较小。

2.3 不同土壤类型下芦苇光合作用参数的日变化特征

光合作用决定了植物生产力的高低,同时是对环境条件变化很敏感的生理过程^[11]。大量研究表明在芦苇叶片光合作用参数中,芦苇叶片净光合速率的日变化均为双峰曲线^[12-14]。本研究由于天气原因只测量了从早上 8:00 到下午 14:00 的芦苇光合作用参数。由图 1 可知,不同土壤类型的芦苇光合参数净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、叶片蒸腾速率(T_r)的变化趋势相似,都是从 8:00 开始逐渐增加,在 10:00 左右达到一个峰值,随后开始稍有下降,在 12:00 出现“午休”现象,5 种土壤类型的光合参数值 P_n 、 G_s 、 T_r 都有所下降,随后又开始逐渐上升;而芦苇的细胞间隙 CO_2 浓度 C_i 在 5 种土壤类型中变化基本一致,但与 P_n 和 G_s 及 T_r 的变化呈相反的趋势,从 8:00 开始是逐渐下降的,到 10:00 后又开始稍有上升,到 12:00 达到最大值,随后又开

始下降。

由图 1 还可知,5 种不同土壤类型上的芦苇叶片光合参数 P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r 随时间变化的大小均表现为草炭土>沼泽土>原位土>灰钙土>沙土,只有 T_r 在 12:00 左右时表现为沼泽土>草炭土>原位土>灰钙土>沙土,其主要原因可能是芦苇叶片的气孔关闭所致。气孔是植物叶片与外界进行气体交换的通道,其闭合程度对光合作用与蒸腾作用有直接影响^[15],有研究表明,气孔导度对芦苇的蒸腾速率有重大影响,中午芦苇蒸腾速率下降,发生所谓的“午休”现象^[16]。段晓男等^[17]认为气孔导度和蒸腾速率的相关性要比与光合速率的相关性大,主要是光合、蒸腾两个过程的机制是不同的。蒸腾是由气孔控制,与叶肉和大气饱和差相关联的简单扩散过程,而光合则是一个物理、电化学及生化反应的复杂过程^[18],光合过程除了受气孔影响外,还受叶肉限制、光合电子传递、边界层阻力等因素的影响。

2.4 土壤因子对芦苇生物量及净光合速率的影响

2.4.1 土壤因子对芦苇生物量的影响 通径分析(表 3)表明,土壤 TS、SOC、TN、AN、TP 含量与芦苇生物量呈极显著正相关,其间的相关系数分别为 0.995、0.993、0.989、0.911 和 0.850($P<0.01$),土

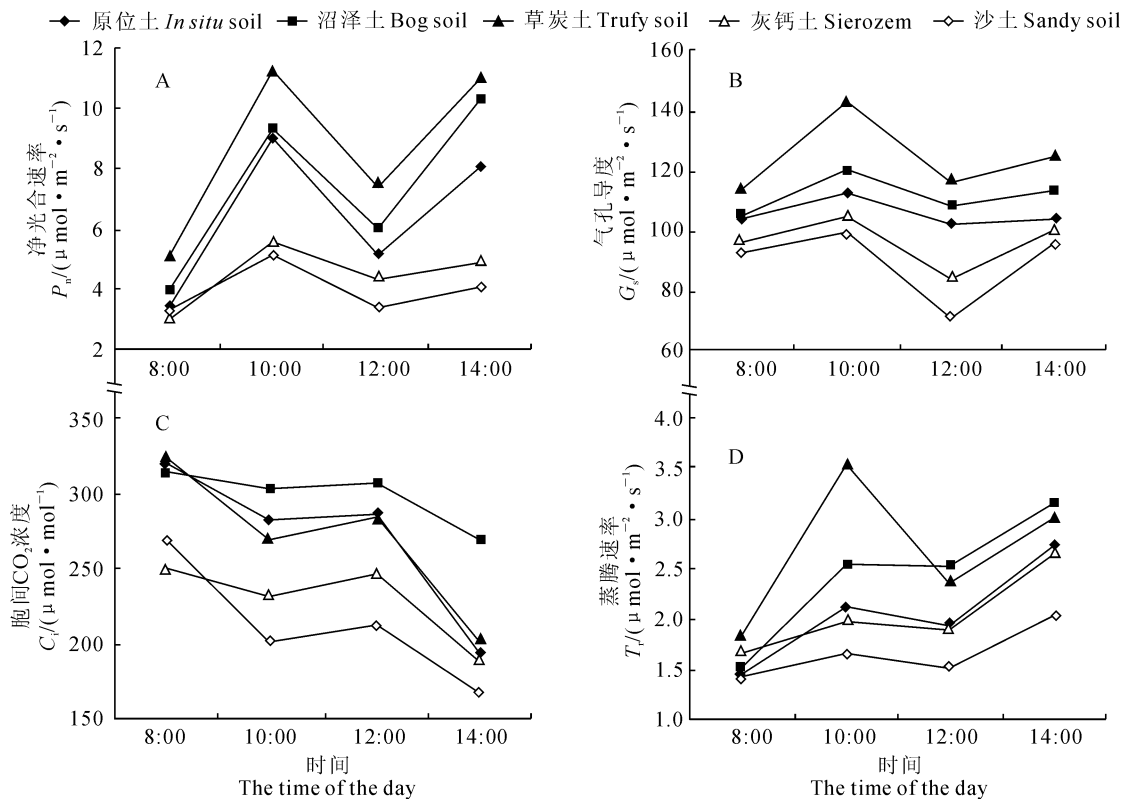


图 1 不同土壤类型下芦苇光合作用参数日变化特征

Fig. 1 Diurnal variation of photosynthesis parameters of reed cultured with different soil types

壤 AP 含量与芦苇生物量呈显著相关($r=0.545, P<0.05$)。土壤因子对芦苇生物量的直接通径系数大小顺序为土壤 SOC 含量>TN 含量>TS 含量>TP 含量>AN 含量>AP 含量。虽然土壤 TS 含量通过 AP 含量对生物量的间接作用为负值,但由于土壤 TS 含量通过其他土壤因子对生物量的间接作用都为正,且土壤 TS 含量对芦苇生物量的直接作用为正,因此没有影响 TS 与生物量呈极显著相关关系。土壤 SOC、TN、AN、TP 含量对芦苇生物量的直接作用都为正,并且通过其他土壤因子(除了 AP 外)对芦苇生物量的间接作用都为正,虽然通过 AP 含量对芦苇生物量的间接作用为负,但因为其值很小,所以并没有影响土壤 SOC、TN、AN、TP 含量与芦苇生物量呈极显著正相关关系。土壤 AP 含量通过其他土壤因子对芦苇生物量的间接作用大部分为负,但 AP 含量对芦苇生物量的直接作用为正,并且通过 SOC 含量对芦苇生物量的间接作用也为正,因此 AP 含量与芦苇生物量的相关关系也为正。土壤因子的决策系数大小顺序为:土壤 SOC 含量>TN 含量>TS 含量>TP 含量>AN 含量>AP 含量。可见,影响芦苇生物量的主要土壤因子为土壤 SOC 含量和土壤 TN 含量。

为了深入探讨上述哪个土壤因子是影响芦苇生

物量最主要的因子,将以上各因子与芦苇生物量进一步作逐步回归分析,最终得到回归方程: $y=5.201x_1+1.448x_2+5.536x_3+2.622x_4+51.074$ (x_1 为 TS, x_2 为 SOC, x_3 为 TN, x_4 为 TP, $R=0.999, P<0.05$)。因此,再次证明土壤 TN 含量和土壤 SOC 含量是影响芦苇生物量最为重要的因子,并且土壤 TS 含量和土壤 TP 含量对芦苇生物量也有重要影响。

2.4.2 土壤因子对芦苇净光合速率的影响 芦苇净光合速率 P_n 与土壤因子通径分析结果(表 4)表明:土壤 SOC、TS、TN、AN、TP、AP 含量与 P_n 呈极显著正相关,相关系数 r 分别为 0.915、0.848、0.866、0.953、0.855 和 0.648($P<0.01$)。土壤各因子对 P_n 的直接通径系数大小为:土壤 TS 含量>SOC 含量>TP 含量>TN 含量>AN 含量>AP 含量。土壤 TS 含量对 P_n 的直接作用为正且值较大,通过其他土壤因子(除 AP 外)对 P_n 的间接作用也为正,使得土壤 TS 含量与 P_n 呈极显著正相关。虽然土壤 SOC 含量、TS 含量、TN 含量、AN 含量、TP 含量通过土壤 AP 含量对 P_n 的间接作用都为负,但是它们对 P_n 的直接作用远远大于这个负的间接作用,因此土壤 SOC 含量、TS 含量、TN 含量、AN 含量、TP 含量与 P_n 呈极显著正相关。土壤 AP 含量

表 3 芦苇生物量与土壤因子的通径系数

Table 3 Path coefficients between biomass of reed and soil factors

土壤因子 Soil factor	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient						相关系数 Correlation coefficient	决策系数 Decision coefficient
		TS	SOC	TN	AN	TP	AP		
TS	0.158		0.365	0.318	0.052	0.105	-0.030	0.995 **	0.300
SOC	0.369	0.156		0.318	0.049	0.103	-0.026	0.993 **	0.597
TN	0.322	0.156	0.356		0.051	0.098	-0.030	0.989 **	0.553
AN	0.056	0.148	0.325	0.294		0.092	-0.038	0.911 **	0.099
TP	0.126	0.132	0.301	0.251	0.041		-0.013	0.850 **	0.198
AP	0.050	-0.093	0.191	-0.191	-0.043	-0.032		0.545 *	0.052

注: * 和 ** 分别表示相关性达到 0.05 和 0.01 显著水平,表 4 同。
Note: * and ** stand for the correlation coefficients are significant at 0.05 and 0.01 level respectively; The same as in table 4.

表 4 芦苇净光合速率与土壤因子的通径系数

Table 4 Path coefficients between P_n of reed and soil factors

土壤因子 Soil factor	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient						相关系数 Correlation coefficient	决策系数 Decision coefficient
		TS	SOC	TN	AN	TP	AP		
TS	2.201		1.565	0.16	0.121	0.233	-0.006	0.848 **	-1.112
SOC	1.582	2.177		0.16	0.128	0.238	-0.007	0.915 **	0.392
TN	0.162	2.175	1.561		0.125	0.223	-0.007	0.866 **	0.254
AN	0.137	1.939	1.481	0.148		0.207	-0.009	0.953 **	0.242
TP	0.285	1.798	1.321	0.127	0.1		-0.003	0.855 **	0.406
AP	0.012	1.138	-0.935	-0.096	-0.105	-0.072		0.648 **	0.015

通过大部分土壤因子对 P_n 的间接作用都为负,但是由于其对 P_n 的直接作用为正,通过 TS 含量对 P_n 的间接作用也为正,从而使得土壤 AP 含量与芦苇 P_n 呈显著正相关。土壤各因子的决策系数为土壤 TP 含量 > SOC 含量 > TN 含量 > AN 含量 > AP 含量 > TS 含量。由此可知,影响芦苇净光合速率的决定因子为土壤 TP 含量、SOC 含量和 TN 含量,土壤 TS 含量为限制因子。

将上述各土壤因子与芦苇 P_n 进行逐步回归分析,最终得到回归方程为: $y = 0.017x_1 + 0.264x_2 + 1.962x_3 - 0.484x_4 + 3.871$ (x_1 为 TN, x_2 为 TP; x_3 为 SOC, x_4 为 TS, $R = 0.964$, $P = 0.01$)。可见,土壤 TN、TP、SOC 含量是影响芦苇净光合速率最重要的因素,土壤 TS 含量是限制因子。

3 讨 论

株高、株径、生物量是衡量芦苇长势的重要表型特征;叶面积的大小对光合作用有直接影响,进而影响了芦苇的生物量。本研究表明,不同土壤类型上芦苇的多度、株高、叶面积、株径、生物量均存在明显差异,其中株高、叶面积、株径、生物量这几个生长特征都是草炭土的值最大,灰钙土或沙土的值最小;不同土壤类型上芦苇的节间数和展叶数没有显著差异,主要是因为这两个生长特征的生态可塑性较小,土壤的变化对其影响不大。进一步将土壤因子与芦苇生物量进行通径分析及逐步回归分析发现,土壤 SOC、TN 含量是决定芦苇生物量的重要因素。在 5 种土壤类型中,草炭土的土壤养分含量是最高的,且孔隙度大,含水量高,样品实测值可达 391.9%,表明其保水能力特别强;而沙土是贫营养且保水性差的土壤,灰钙土是荒漠草原区的干旱土,其土壤性质不适合芦苇的生长。因此,草炭土是最适合芦苇生

长的土壤类型,原位土和沼泽土次之。因此,在人工湿地种植芦苇时,最好用草炭土;如若使用其他类型土壤进行种植,应考虑采取适当措施改良土壤,如适当添加有机肥或者腐殖质等,在改善土壤质地的同时也增加了土壤养分,更利于芦苇的生长。

芦苇属于典型的 C_3 植物,不同土壤条件下芦苇的光合作用有所差异,但总体上来看具有一定的规律性,几乎都在同一时间出现峰值或最小值,并且净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)的变化趋势在时间上是一致的,而细胞间隙 CO_2 浓度 C_i 的变化与 P_n 、 G_s 、 T_r 呈相反趋势,这与陈歆等^[19]对北固山湿地芦苇的相关研究结果一致;但是各类型土壤间比较而言,芦苇各光合参数值都为草炭土的值最大。光合作用是一个十分复杂的过程,很容易受环境因子及自身特性所影响^[20]。因此,本研究将土壤因子与芦苇的 P_n 进行通径分析及逐步回归分析,发现土壤 TS 含量、SOC 含量、TN 含量、AN 含量、TP 含量、AP 含量对 P_n 有正的直接作用,影响 P_n 的决定因子为土壤 TN 含量、SOC 含量和 TP 含量,土壤 TS 含量为限制因子。有研究表明,叶绿素中的 N、P 对光合作用的影响显著,而湿地生态系统中的土壤 N、P 容易失衡,导致对光合作用的影响出现差异^[21]。Wassen 等^[22]、Koerselman 等^[23]通过对湿地植被施肥试验发现,判断元素限制的 $N:P$ 阈值为: $N:P < 14$ 则 N 是限制因子, $N:P > 16$ 则 P 是限制性因子;吴统贵等研究表明,P 是芦苇光合作用的限制因子^[21]。因此,土壤中的 N、P 含量间接影响了芦苇的光合作用,本研究还表明,土壤中的 C 对芦苇光合作用也有重要影响。本实验中的草炭土含有较高的土壤养分,且具有很强的保水能力,该土壤上的芦苇生长较好,光合作用较强,是湿地芦苇群落修复中最佳的基质类型。

参考文献:

- [1] CHEN Y Y(陈宜瑜), LÜ X G(吕宪国). The wetland function and research tendency of wetland science[J]. *Wetland Science* (湿地科学), 2003, 1(1): 7-11 (in Chinese).
- [2] TIAN W D(田文达). Reed wetland and the environment[J]. *Modern Agricultural Science and Technology* (现代农业科技), 2007, (23): 213-214 (in Chinese).
- [3] 单鱼洋. 不同盐度灌溉水对芦苇生长动态和生理特性影响研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2008.
- [4] ZHANG A Q(张爱勤), GAO M L(高美玲), ZHAO H(赵宏). Research on relationship of reed growth and water in Zhalong Wetland [J]. *Helongjiang Environmental Journal* (黑龙江环境通报), 2005, (4): 29-30 (in Chinese).
- [5] BI Z L(毕作林), XIONG X(熊雄), LU F(路峰), et al. Studies on ecological amplitude of reed to the environmental gradient of water depth[J]. *Shandong Forestry Science and Technology* (山东林业科技), 2007, (4): 1-4 (in Chinese).
- [6] DENG CH N(邓春暖), ZHANG G X(章光新), PAN X L(潘响亮). Eco-physiological responses of *Phragmites australis* to different water

- depth in Momoge Wetland[J]. *Ecological Science* (生态科学), 2012, **31**(04): 353—355 (in Chinese).
- [7] CUI B SH(崔保山), ZHAO X SH(赵欣胜), YANG ZH F(杨志峰), *et al.* The response of reed community to the environment gradient of water depth in the Yellow River Delta[J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2006, **26**(5): 1 534—1 540 (in Chinese).
- [8] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008: 25—183.
- [9] NAI L(倪 磊), SU ZH D(苏占东), XU L N(徐丽娜), *et al.* Formation environment and distribution characteristics of main swamp turfy soil in China[J]. *Journal of Jilin University* (Earth Science Edition) (吉林大学学报·地球科学版), 2012, **42**(5): 1 478—1 484 (in Chinese).
- [10] WANG Y(王 勇), WANG K(王 康), TOSHINORI KOJIMA(小岛纪德), *et al.* Influence of sand-fixation vegetation multifunctional macromolecule composites at physical characters of sand[J]. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2009, **23**(1): 142—144 (in Chinese).
- [11] 张征坤. 土壤水分对不同树种光合作用日动态过程的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2012.
- [12] LI P P(李萍萍), CHEN X(陈 歆), FU W G(付为国), *et al.* Photosynthetic characteristics of phragmites communis in Mount Beigu wetland[J]. *Journal of Jiangsu University* (Nat. Sci. Edi.) (江苏大学学报·自然科学版), 2005, **26**(4): 337—339 (in Chinese).
- [13] DENG CH N(邓春暖), ZHANG G X(章光新), PAN X L(潘响亮), *et al.* Mechanism of influence of drought stress on photosynthetic physiological ecology of *Phragmites australis* leaves in Momoge Wetlands[J]. *Wetland Science* (湿地科学), 2012, **10**(2): 137—141 (in Chinese).
- [14] GUO X Y(郭晓云), YANG Y F(杨允菲), LI J D(李建东), *et al.* Studies on the photosynthetic characteristics of the leaves of *Phragmites communis* in different dry land habitats in the Songnen Plains in China[J]. *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), 2003, **12**(3): 17—21 (in Chinese).
- [15] GALLOPIN G C. The potential of agro-ecosystem health as a guiding concept for agricultural research[J]. *Ecosystem Health*, 1995, (1): 129—141.
- [16] LENG P SH(冷平生), YANG X H(杨晓红), HU Y(胡 悦), *et al.* Studies on the characteristics of photosynthesis and transpiration of five gardening trees[J]. *Journal of Beijing Agricultural College* (北京农学院学报), 2000, **15**(4): 15—17 (in Chinese).
- [17] DUAN X N(段晓男), WANG X K(王效科), FENG ZH ZH(冯兆忠), *et al.* Study on the photosynthetic and transpiration properties of wild *Phragmites australis* in the Wuliangshuai Lake, Inner Mongolia[J]. *Arid Land Geography* (干旱区地理), 2004, **27**(4): 638—641 (in Chinese).
- [18] ZHAO M(赵 明), LI SH K(李少昆), WANG M Y(王美云). Stomatal resistance of maize leaf and its relationship with photosynthesis and transpiration under different field conditions[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 1997, **8**(5)B: 481—485 (in Chinese).
- [19] 陈 歆. 北固山湿地优势植物的光合作用特性及人工修复技术研究[D]. 南京: 江苏大学, 2005.
- [20] LIU W G(刘卫国), ZOU J(邹 杰). Reed photosynthetic response under water-salt stress in Keriya River Watershed[J]. *Acta Bot. Boreali. -Occidental. Sin.* (西北植物学报), 2014, **34**(3): 572—580 (in Chinese).
- [21] WU T G(吴统贵), LI Y H(李艳红), WU M(吴 明), *et al.* Dynamics of photosynthetic characteristics in *Phragmites communis* and its influencing factors[J]. *Acta Bot. Boreali. -Occidental. Sin.* (西北植物学报), 2009, **29**(4): 789—794 (in Chinese).
- [22] WASSEN M J, OLDE V H G M, DE SWART E O A M. Nutrient concentrations in mire vegetation as a measure of nutrient limitation in mire ecosystems[J]. *Journal of Vegetation Science*, 1995, **6**(1): 5—16.
- [23] KOERSELMAN W, MEULEMAN A F M. The vegetation N : P ratio: A new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. *Journal of Applied Ecology*, 1996, (33): 1 441—1 450.