



银川市典型湖泊湿地中芦苇生长特性 及其生境土壤因子研究

乔 斌^{1,2}, 何彤慧^{1,2*}, 吴春燕^{1,2}, 苏芝屯^{1,2}

(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 宁夏大学 西北土地退化与生态恢复省部共建国家重点实验室培育基地, 银川 750021)

摘 要: 该研究以银川市典型湖泊湿地芦苇为对象, 通过原位试验监测芦苇生长发育过程中生长指标的月份变化特征, 建立形态指标与群落数量指标关系估测模型, 分析影响芦苇生长的主要土壤因子, 为湖泊湿地生态恢复工程和芦苇湿地的有效管理提供理论依据。结果表明: (1) 银川湖泊湿地芦苇在 5~7 月间生长速率快 ($P < 0.05$), 在 8~9 月份生长累积速率减缓 ($P > 0.05$), 芦苇株高、盖度、生物量等指标峰值出现在 8 月或 9 月, 10 月份各生物学指标出现上下波动变化 ($P > 0.05$)。 (2) 银川湖泊湿地芦苇种群密度增加, 群落环境改变, 单株生存空间缩小, 抑制了茎秆横向生长, 表现为密度与茎粗呈极显著负相关关系; 单株展叶数增加, 单株叶面积伴随增长, 群落尺度盖度和地上生物量也相应极显著增加 ($P < 0.01$)。 (3) 在 5~10 月, 各月株高与地上生物量的关系可用幂函数模型或指数函数模型表达, 生长初期表现出一定的正相关关系, 之后随生长速率变缓这种正相关趋于减弱并消失; 在 6~8 月, 各月茎粗与单株地上生物量拟合效果依次增加, 随单株地上生物量累积量越来越大, 茎秆横向生长起到了物理支撑作用; 形态指标与生物量指标在峰值期 (8 月或 9 月) 拟合效果最佳, 多为幂函数模型, 表现为异速生长关系。 (4) 土壤全氮 (TN)、土壤有机碳 (SOC)、土壤碱解氮 (AN)、全盐、pH、土壤速效钾 (AK) 均是影响芦苇生长的特征因子, 并以 TN、SOC 对芦苇生长发育影响最大。

关键词: 芦苇; 生长过程; 生物学特征; 土壤基质; 银川市; 湖泊湿地

中图分类号: Q945.79

文献标志码: A

Study on Growth Characteristics of Reed and Its Habitat Soil Factors in Typical Lake-Wetland of Yinchuan

QIAO Bin^{1,2}, HE Tonghui^{1,2*}, WU Chunyan^{1,2}, SU Zhitun^{1,2}

(1 Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem, Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2 Breeding Base of State Key Laboratory for Preventing Land Degradation and Ecological Restoration, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: In this study, we selected the reed (*Phragmites australis*) of typical lake-wetland in Yinchuan to explore the monthly change characteristics of the growth index of reed, established the prediction model of the relationship between reed biological characteristics and analyzed the main soil factors affecting the growth of reed in habitat, which provides a theoretical basis for the ecological restoration of lake-wetland and the effective management of reed wetland. The main conclusions are as follows: (1) the growth rate of reed was fast in Yinchuan lake-wetland from May to July ($P < 0.05$) and the growth rate slowed down from August to September ($P > 0.05$). The peak value of plant height, coverage and biomass appeared in

收稿日期: 2016-11-28; 修改稿收到日期: 2017-03-08

基金项目: 国家自然科学基金 (41361095)

作者简介: 乔 斌 (1988—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事植物生态和湿地生态恢复方面的研究。E-mail: 8807qiaobin@163.com

* 通信作者: 何彤慧, 博士, 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

August or September, and the biological indexes in October showed changes in the ups and downs ($P>0.05$). (2) In Yinchuan lake-wetland, the density of reed increased, the community environment changed, and the living space of individual plant was reduced, which inhibited the lateral growth of stem, and the density was negatively correlated with stem diameter ($P<0.01$). Leaf area per plant increased, leaf area per plant also significantly increased along with the increase of biomass and plant biomass in aboveground biomass($P<0.01$). (3) The relationship between plant height and aboveground biomass can be expressed by the power function model or the exponential function model. The positive correlation between the plant height and the aboveground biomass in the early growth stage showed a positive correlation and then decreased with the growth rate. The aboveground biomass of June–August stem diameter increased with the increase of aboveground biomass, and the stem lateral growth has played a role of physical support. Morphological and biomass indices were best fitted in the peak period(August or September), which were all power function models, which showed allometric relationship. (4) Soil total nitrogen (TN), soil organic carbon (SOC), soil available nitrogen (AN), total salt, pH and available potassium (AK) were the characteristic factors affecting the growth of reed, and the effect of TN and SOC was the greatest on the growth of reed.

Key words: *Phragmites australis*; growth process; biological characteristics; soil habitat; yinchuan; lake-wetland

芦苇(*Phragmites australis*)作为多年生根茎型无性系植物^[1-2],在湖滨、沟渠、河流滩涂、盐碱地等生境均可形成单优群落^[3]。银川平原地处西北内陆干旱地区,自秦汉以来 2 000 多年的引黄灌溉开发,造就了灌区绿洲独特的湿地景观,河流湿地(黄河)、滩涂湿地、湖沼湿地、沟渠湿地均有分布。统计数据显示银川平原湿地总面积达 $2.07\times10^5\text{ hm}^2$,占区域国土面积的 25.83%,远高于 3.77% 的全国平均水平,其中芦苇湿地约占全区总湿地面积的 60% 以上^[4]。芦苇作为世界广布种,有较高的社会、经济、生态价值,国内外学者已开展了不少研究。目前,有关芦苇生物学特征的研究主要集中在其生物学特征对水深^[5-6]、盐度^[7-8]、气候变化^[9]等环境因子的响应上,从生活史水平来探究芦苇生物学指标时序动态过程的研究较少。

近年来,银川市在“生态优先”理念的指导下,加大了对湿地资源的保护力度,大力实施了湖泊湿地恢复与保护工程,从根本上扭转了 20 世纪 70 年代以来湖泊大面积萎缩的僵局。在银川市湖泊湿地恢复中,芦苇被选为湿地恢复的基本工具种,然而在湖泊湿地恢复与重建后,湖泊湿地中的芦苇出现了一定程度的退化,加之未能有效对芦苇进行持续监测及气候、水质、城市扩张、管理效率、湿地生态系统脆弱等不稳定因素的影响,进一步加剧了银川市湖泊湿地芦苇的退化。打破传统静态观测,寻求动态测序来监测芦苇生长过程,有利于提高银川市湖泊湿地芦苇的监测管理水平,认知湿地生态系统的脆弱性程度。因此,本研究以银川市典型湖泊湿地芦苇

为对象,通过原位试验监测芦苇生长发育特征,建立形态指标与群落数量指标关系估测模型,分析芦苇立地生境中影响芦苇生长的主要土壤因子,以期为银川市湖泊湿地生态恢复工程效益的持续维持和芦苇湿地的有效管理提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况及典型湖泊选取

银川深居中国西北内陆,干旱少雨、蒸发强烈,年降水量只有 200 mm 左右,属典型的中温带大陆性气候。但其位于黄河上游银川平原中部,得利于引黄灌溉,成为干旱地区独具特色的绿洲城市。银川市湿地资源丰富,湖泊众多,历史上就有“七十二连湖”之说。现有面积大于 8 hm^2 的湖泊 159 个,其中自然湖泊 145 个,水库(人工湖)14 个,总面积 $1.56\times10^4\text{ hm}^2$ 。同时有 36 处湖泊被列入了银川市重要湖泊名录^[10]。为了体现银川市不同行政区域、不同面积、不同功能定位的湖泊,本研究选取了鸣翠湖、阎家湖、宝湖、阅海(阅海北湖)、文昌双湖作为典型湖泊。其中,鸣翠湖、阅海是国家林业局确定的国家湿地公园,面积分别为 472.2 hm^2 和 $1\,790.6\text{ hm}^2$,宝湖是住房和城乡建设部确定的国家城市湿地公园,面积 39.0 hm^2 。同时,鸣翠湖、宝湖、阅海也被列入了银川市重要湖泊名录。阎家湖和文昌双湖在行政区划上则分别位于银川市兴庆区和西夏区。

21 世纪以来,银川市大力实施了湖泊湿地恢复与保护工程,通过扩大湖泊面积、恢复湖泊植被、整治湖泊环境等一系列措施,打造“塞上湖城”的美好

愿景初步实现。2006 年银川市湖泊湿地恢复与保护项目获得了“中国人居环境范例奖”。在选取的银川市典型湖泊中,芦苇分布面积大且为优势植物群落,对改善其湖泊水生态和延缓湖泊沼泽化意义重大。

1.2 样地设置

在银川市典型湖泊鸣翠湖、阎家湖、宝湖、阅海(阅海北湖)、文昌双湖中,选取具有代表性的人为干扰较小或无人干扰的芦苇单优群落作为采样区。根据芦苇的生长状态在各典型湖泊中共设置了 13 个样区,其中鸣翠湖、阎家湖、阅海各 3 个,宝湖和文昌双湖各 2 个。在每个样区设置 3 个 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的固定样方,监测记录样方中芦苇群落的盖度、密度、株高、茎粗、叶长、叶宽、展叶数、叶面积等生长指标。地上生物量取样为 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的样方,在所在样区固定样方附近取样,使用割草铗直接收割。所有生长指标的测定均做 5~8 次重复,监测期从 5 月开始,10 月结束,每月上下旬各采样 1 次。生长末期(10 月)在各样区用土钻或铁锹分别取 20~40 cm 厚度的底泥装入自封袋中带回实验室分析,每个样地 5 次重复。

1.3 指标测定

茎粗为湖泊底泥基准面处单株读数,叶长为单株最长叶片读数,叶宽为单株叶片中最宽处读数,展叶数为单株完全展开叶片读数,叶面积运用扫描仪将植物叶片进行扫描,然后用软件 DT-scan 统计叶面积,株高、地上生物量的测量均从湖泊底泥基准面以上部分开始计算。收割好的地上生物量装入密封袋中,带回实验室称取鲜重,之后摘取叶片,将其茎构件和叶构件分开装入纸袋中,放入 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱中烘干至恒重后称量其构件生物量。

带回实验室的土壤通过避光晾干混匀研磨后再进行分析,用 pH 计测定土壤 pH 值,用电导率仪测定土壤全盐含量,用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7\text{-H}_2\text{SO}_4$ 外加热法测定土壤有机碳(SOC)含量,用半微量凯氏定氮法测土壤全氮(TN)含量,用 $\text{NaOH-H}_3\text{BO}_3$ 法测定土壤碱解氮(AN)含量,用 NaHCO_3 浸提-钼锑抗比色法测定土壤有效磷(AP)含量,用中性醋酸钠熔融-火焰光度计测定土壤速效钾(AK)含量。

同时需要说明,由于在 5~6 月份,芦苇处于萌芽期和生长初期,还未展叶或为嫩叶,还没有成熟叶片,故叶长、叶宽、单株叶面积在部分月份没有数据。在 5 月份,芦苇未出露或刚露出土壤,故芦苇茎粗没有数据,在 9~10 月,芦苇茎粗基本停止生长,加之

茎粗为湖泊底泥基准面处单株读数,水位较深,测量难度较大,故缺失。

1.4 数据处理

用 SPSS19.0 软件单因素水平的参数检验法检验芦苇生长指标和土壤因子指标,其中正态性检验用 QQ-Pots 检验($P>0.05$),若数据不满足正态性,对数据进行对数转换,方差齐性检验用 Levene's 法检验($P>0.05$)。差异性检验用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差法(least-significant difference, LSD)或 Tamhane's T2 法,若方差齐性($P>0.05$)用 LSD 法检验,若方差非齐性($P<0.05$)用 Tamhane's T2 法检验。指标相关性用皮尔逊(Pearson)相关系数法判定,再用回归分析拟合回归方程,在 $y=Ax+B$ 、 $y=Ax^B$ 和 $y=Ae^{Bx}$ 中选取 R^2 最大者,且通过显著性水平检验的定为最佳回归方程。土壤指标用主成分分析法(Principal Component Analysis, PCA)分析。

2 结果与分析

2.1 芦苇生物学特征的季节性变化规律

2.1.1 形态特征 表 1 表明,芦苇叶长在 7~10 月间差异均不显著($P>0.05$);芦苇叶宽在 8~10 月间差异也均不显著;芦苇茎粗在 7 和 8 月份比 6 月份显著增加($P<0.05$),而其在 7 月与 8 月间无显著差异;株高在 5~8 月间逐渐显著增加,相邻月份之间分别依次显著增长了 77.96%、17.78%、8.21%,生长速率由快变慢,株高在 8 月之后基本停止生长,其在 8~10 月间差异不显著;单株展叶数在 5~10 月间变化呈现单调上升趋势,其在 5~7 月间差异显著,并显著低于 9、10 月,而 8~10 月间已差异不显著,单株平均展叶数稳定在 13 左右,基本停止生长;单株叶面积在 7 月份急速显著增加,而在 7~9 月变化均不显著,基本停止增加且出现波动。可见,芦苇叶长、叶宽、茎粗在 5~10 月份变化不显著,而其株高、单株展叶数、单株叶面积表现为先单调上升,至 8 月份后基本维持稳定,累积速率先快后慢。

2.1.2 群落数量特征 芦苇群落指标在 5~10 月份表现出不同的显著差异性(表 2)。其中,芦苇群落盖度随时间先升后降,并以 9 月份最大,在 5~7 月间盖度变化差异显著($P<0.05$),相邻月份分别增加了 21.18%、28.93%,之后波动在 65%左右,且 7~10 月间变化不显著($P>0.05$);芦苇群落密度亦表现出先增加后降低趋势,并在 9 月份达到最大值,

表 1 银川湖泊湿地 5~10 月芦苇形态指标时序特征

Table 1 Dynamic characteristics of reed morphological index in Yinchuan lake-wetland from May to October

月份 Month	叶长 Leaf length/cm	叶宽 Leaf width/cm	茎粗 Stem diameter/mm	株高 Plant height/cm	单株展叶数 Exhibition leaf number per plant	单株叶面积 Leaf area per plant/cm ²
5	—	—	—	138.45±73.74d	3.96±1.53d	—
6	—	—	7.21±3.67b	246.39±87.48c	9.28±2.11c	51.43+8.17b
7	44.16±13.01a	—	7.47±3.28a	290.20±107.15b	11.24±2.96b	964.87+612.72a
8	45.07±10.11a	4.12±0.98a	8.77±4.08a	314.02±107.62a	12.29±5.17ab	1 249.15+859.63a
9	48.20±12.02a	4.18±1.09a	—	309.86±105.42a	13.02±5.20a	1 160.54+560.70a
10	46.94±12.19a	3.98±0.90a	—	312.08±109.52a	13.60±4.18a	—

注:同列不同字母代表差异显著($P<0.05$)。各指标数据均为 5 个典型湖泊所有采样区的平均值±标准差。下同。“—”表示数据缺失
Note: In the same column, different letters represent significant differences ($P<0.05$). The data of each index are the mean ± standard deviation of all sampling areas of five typical lakes. The same as below. “—” indicates that the data is missing

表 2 银川湖泊湿地 5~10 月芦苇群落指标时序特征

Table 2 Dynamic characteristics of reed community index in Yinchuan Lake-Wetland from May to October

月份 Month	盖度 Coverage/%	密度 Density /(plant·m ⁻²)	地上生物量 Aboveground biomass /(g·m ⁻²)	株地上生物量 Aboveground biomass per plant/g	单株叶生物量 Leaf biomass per plant/g	单株茎秆生物量 Stem biomass per plant/g	植物组织含水量 Water content of plant tissue/%
5	41.36±23.13c	—	494.77±632.90d	—	—	—	80.55±5.89a
6	50.12±18.01b	98.94±86.34c	2 077.30±6 001.24c	17.13±8.59b	3.57 北 3.31c	11.59±1.82b	74.80±9.25b
7	64.62±14.83a	173.91±113.85b	3 946.03±4 735.54b	24.25±4.03ab	4.70±2.98bc	20.02±2.94a	61.81±8.96cd
8	63.67±15.96a	176.58±122.39ab	4 976.59±2 416.08a	26.38±3.27ab	5.85±4.46ab	18.53±2.66ab	62.77±7.85c
9	68.82±22.40a	181.48±182.89a	4 880.90±4 081.12a	29.98±3.05a	7.45±5.42a	22.55±2.33a	57.66±5.95d
10	65.06±17.11a	177.50±113.49ab	4 243.15±3 623.85ab	26.01±2.60ab	5.84±3.65ab	20.16±2.14a	52.49±6.49d

7 月份比 6 月份显著增加了 75.77%,在 9 月份前后波动变化不显著;地上生物量在 5~8 月累计速率快且变化显著,于 8 月出现峰值,之后缓慢下降但不显著,表现为典型的单峰型曲线,5~8 月地上生物量在相邻月份间分别显著增长了 391.85%、89.96%、26.12%;芦苇单株地上生物量、单株叶生物量增长累积在 6~10 月份表现为单峰型曲线,峰值均出现在 9 月,10 月出现了微降,6~10 月份间单株地上生物量累积速率分别为 41.56%、8.78%、13.65%、-13.24%,单株叶生物量累积速率分别为 31.65%、24.47%、27.25%、-21.61%。芦苇单株茎秆生物量累计趋势在 6~10 月份表现为波动性单峰曲线(峰值出现在 9 月),其在 6 月与 7 月间差异显著,而在 7~10 月间差异均不显著;植物组织含水量表现为逐渐波动下降趋势,5 月最大,10 月最小,各月份间差异显著。

2.2 芦苇生长季生物学特征间的关系分析

2.2.1 相关性分析 芦苇形态特征与群落数量特征的 Pearson 相关性分析结果(表 3)表明,茎粗与密度呈极显著负相关($P<0.01$),与单株地上生物量、单株叶生物量、单株茎秆生物量分别呈极显著正

相关;株高与盖度、地上生物量分别呈极显著正相关,与植物组织含水量呈极显著负相关;单株展叶数与盖度、地上生物量分别呈极显著正相关,与植物组织含水量呈极显著负相关;单株叶面积与盖度、地上生物量分别呈极显著正相关,与植物组织含水量呈极显著负相关。

2.2.2 回归模型分析 依据芦苇形态指标与群落数量指标的 Pearson 相关系数,选取株高、地上生物量、茎粗、单株地上生物量指标,对 5~10 月份株高与地上生物量、6~8 月份茎粗与单株地上生物量进行回归分析,在 $y = Ax + B$ 、 $y = Ax^B$ 和 $y = Ae^{Bx}$ 中选取通过显著性水平检验的方程绘制回归关系图,具体统计结果见图 1。首先,5~10 月份株高与地上生物量拟合最佳回归方程的 R^2 分别为 0.5877、0.4778、0.4770、0.3494、0.1503、0.1569。随着株高和地上生物量累积量的增加,拟合估测效果降低,生长初期株高与地上生物量表现出一定的正相关,之后随着生长速率的变缓这种正相关趋于减弱并消失。其次,6~8 月茎粗与单株地上生物量拟合方程的 R^2 依次增大,分别为 0.3846、0.5977、0.7401。6 月、7 月茎粗与单株地上生物量用线性函数拟合 R^2

表 3 银川湖泊湿地芦苇群落生物学特征 Pearson 相关性

Table 3 Pearson correlation of biological characteristics of reed population in Yinchuan lake-wetland

群落指标 Community index	形态指标 Morphological index					
	叶长 Leaf length	叶宽 Leaf width	茎粗 Stem diameter	株高 Plant height	单株展叶数 Exhibition leaf number per plant	单株叶面积 Leaf area per plant
盖度 Coverage	0.055	-0.027	-0.079	0.382**	0.434**	0.489**
密度 Density	0.163	-0.025	-0.550**	0.174**	0.119	0.102
地上生物量 Aboveground biomass	0.115	0.011	-0.017	0.262**	0.452**	0.676**
单株地上生物量 Aboveground biomass per plant	-0.005	-0.056	0.518**	0.030	0.081	0.051
单株叶生物量 Leaf biomass per plant	0.018	0.119	0.316**	0.095	0.079	0.018
单株茎秆生物量 Stem biomass per plant	0.008	-0.055	0.516**	0.055	0.101	0.082
植物组织含水量 Water content of plant tissue	-0.080	0.144	0.026	-0.203**	-0.397**	-0.367**

注: ** 表示相关性达到 0.01 显著水平(双侧)
Note: ** indicate correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

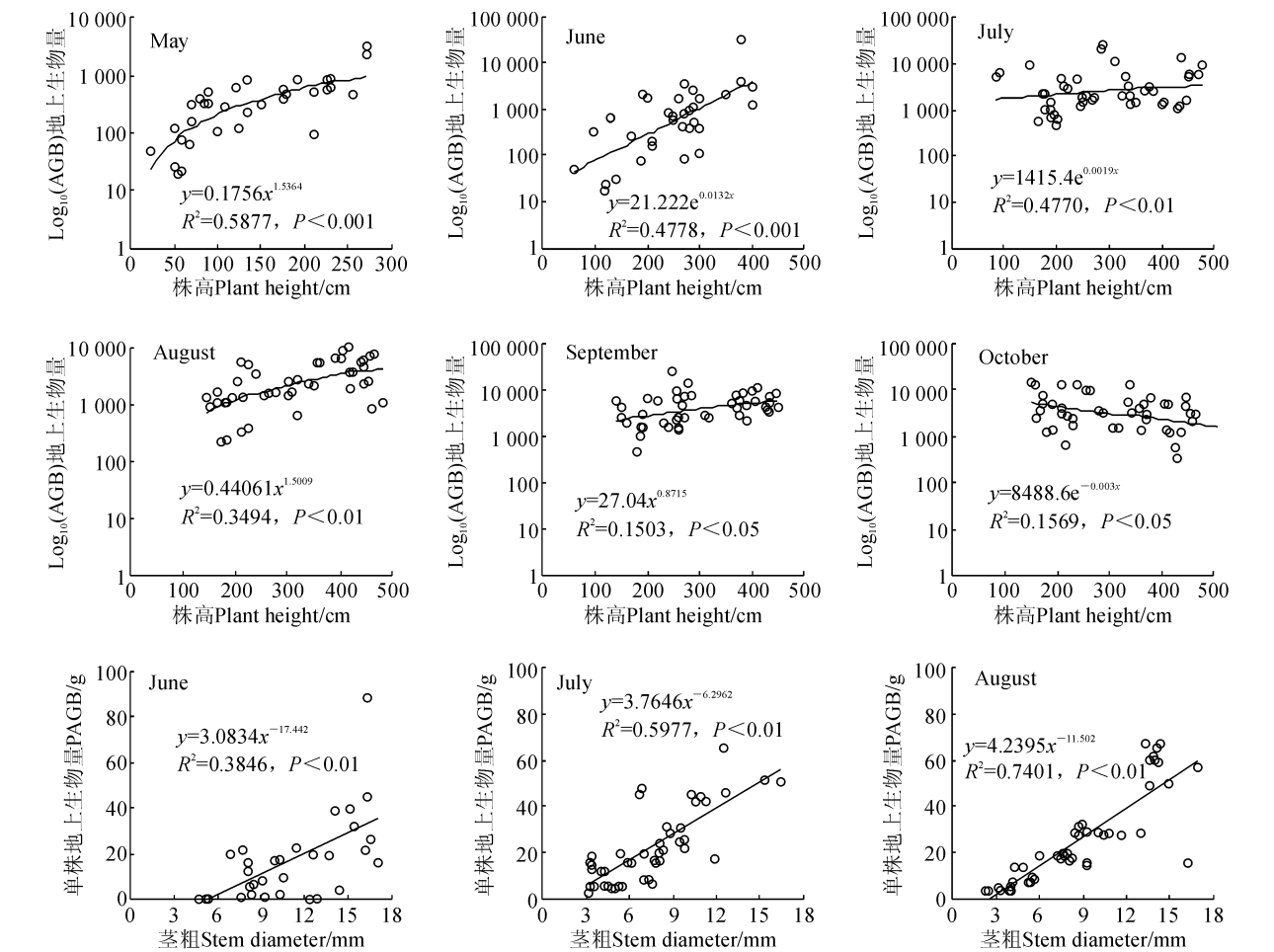


图 1 银川湖泊湿地 5~10 月芦苇株高与地上生物量以及茎粗与单株地上生物量的关系

Fig.1 Relationship between plant height and aboveground biomass, stem diameter and aboveground biomass of reed plants in Yinchuan lake-wetland from May to October

最大,8月用幂函数拟合 R^2 最大。进一步对 8 月茎粗与单株地上生物量用线性函数拟合,方程为 $y = 3.9661x - 10.395 (R^2 = 0.5447, P < 0.05)$ 。由此可知,6~8 月茎粗与单株地上生物量线性拟合的斜率分别为 3.0834、3.7646、4.2395,随着单株地上生物量累积量的增加,对茎粗的依赖程度不断增加。

进一步对芦苇叶长、叶宽、株高与其单株地上生物量、单株叶生物量、单株茎秆生物量进行拟合回

归,选取拟合方程 R^2 最高的月份绘制回归关系图,具体统计结果见图 2。其中,叶长、叶宽与单株叶生物量在 9 月拟合效果最佳(R^2 分别为 0.6945 和 0.7549),叶长、叶宽和单株叶生物量也均是 9 月份达到一年中的峰值;5~10 月中,株高与单株地上生物量、单株茎秆生物量的拟合效果均在 8 月份最佳(R^2 分别为 0.7584 和 0.7368),株高峰值也出现在 8 月,单株地上生物量和单株茎秆生物量峰值虽均出现在 9 月,但都与 8 月不存在显著差异。值得注意的是,除叶长与单株叶生物量最佳拟合方程为指数函数外,其余最佳拟合方程均为幂函数。

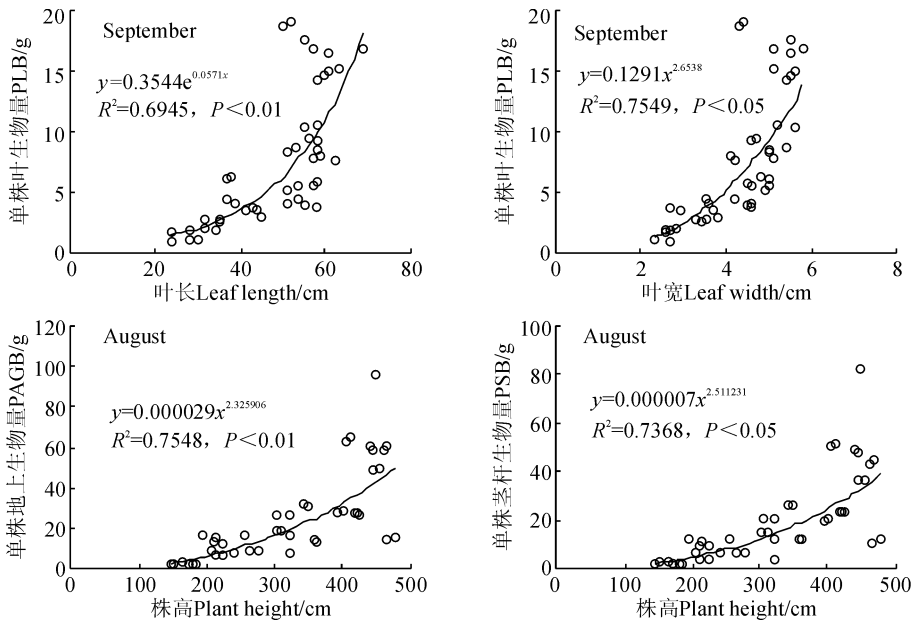


图 2 银川湖泊湿地芦苇形态指标与群落数量指标最佳拟合效果

Fig. 2 The best fitting effect of morphological index and community index of reed in Yinchuan lake-wetland

表 4 银川湖泊湿地芦苇土壤生境因子主成分分析

Table 4 Principal component analysis of soil habitat factors of reed in Yinchuan lake-wetland

主成分 Principal component	成分 1 Component 1	成分 2 Component 2
全盐 Total salt content	0.515	0.737
pH	−0.142	0.717
碱解氮 AN	0.876	−0.387
速效钾 AK	0.647	−0.345
有机碳 SOC	0.920	0.339
全氮 TN	0.947	−0.029
特征值 Eigenvalue	3.216	1.442
方差的百分比 The percentage of variance/%	53.595	24.033
累积百分比(贡献率)Contribution rate/%	53.595	77.628

注:各土壤因子对应的数据表示在各主成分上的因子载荷
Note: The corresponding data of each soil factor show the main components of the load factor

3 讨 论

3.1 典型湖泊湿地芦苇生物学特征的季节性变化规律

McGraw 等^[11]认为监测植物的生物学指标具有重要的生态学意义。从本研究中 5 个典型湖泊湿地芦苇各生物学指标的监测结果综合来看,芦苇的生长过程呈现明显的季节性规律。在 5~7 月间芦苇处于快速生长期,生长速率快,各生物学指标(形态指标、群落数量指标)增加显著($P < 0.05$);在 8~9 月份生长累积速率降缓,各生物学指标的峰值均出现在 8 月份或 9 月份,芦苇生长达到最盛期;在 10 月份到生长后期,各生物学指标出现下降或上升,但变化均不显著($P > 0.05$),此时芦苇部分叶片开始枯萎,部分植株出现折损,导致盖度、密度、地上生物量的下降,预示着衰退期来临,物质和能量储存开始向地下部分转移,以保证次年芦苇根茎的正常分蘖繁殖。

从各指标分别来看,芦苇株高变化在时间序列上表现为先迅速增加,之后基本维持不变,这与管博等^[2]、许秀丽等^[12]的研究结果一致;同时芦苇在 7~8 月间陆续进入有性生殖期,植株开始抽穗,因而此时间段株高明显增加($P < 0.05$)。芦苇种群密度在 6~7 月间和在 8~9 月间显著增大($P < 0.05$),而在 7~8 月间和在 9~10 月间变化不显著($P > 0.05$),芦苇种群密度的阶梯式增加,体现出芦苇种群的密度制约效应及种群自疏法则^[12-13],这与李长明等^[5]、王雪宏等^[14]的研究结果类似;同时,芦苇种群密度在 8~9 月间的显著增加还可能与根茎新分蘖有关^[15]。芦苇的叶片作为主要的光合器官,为植株提供了营养物质,承担着合成有机质和存储能量的功能,因而资源配置稳定的成熟叶片的大小、形状差异不大,叶片表型可塑性小。生物量累积动态过程是植物生活史理论研究的重要内容,有助于理解生态系统碳循环^[16]。本研究表明芦苇生物量指标在时间序列上为单峰型曲线,与前人有关芦苇种群生物量季节变化规律^[17-18]的研究结果一致。芦苇组织含水量表现出单调下降趋势,生长初期植株组织鲜嫩,植物含水量高,生长盛期植株逐渐成熟,植物组织含水量下降,生长末期植株开始枯萎,植物组织含水量进一步下降。

可见,由于自然界存在季节周期性变化,因而芦苇生长也具有生活史周期,一年中大致要经历萌发期、营养期、生殖期、衰退期和休眠期。芦苇通过物

质分配和调控完成生长发育过程,蕴涵着深刻的适应机理^[19],反映出芦苇种群很强的生活史投资策略^[20]和生态适应性^[6, 21],说明芦苇种群适应性及可塑性强,从而保证了芦苇种群的持续生存和繁衍。芦苇首先通过个体形态特征变化表达,进而影响到种群和群落尺度。芦苇生物学特征的变化是芦苇生长发育过程的直观映射,而芦苇生长的季节周期又是芦苇生物学特征变化的内在驱动力,体现芦苇的生态型,反映芦苇植株的结构与功能,折射芦苇种群的生存策略。

3.2 典型湖泊湿地芦苇生物学特征之间的关系

植物的生物学指标间存在着相互依赖和相互制约的关系,体现着植物适应环境及自然选择策略^[22],决定着植株的结构和功能^[23-24]。本研究分析芦苇形态特征与群落数量特征的相关性有助于理解芦苇自身生态系统各构件协同机制。研究中发现,芦苇种群密度增加,群落环境发生变化,单株生存空间缩小,抑制了茎秆横向生长,反映出芦苇种群成熟的资源投资调节机制和生存对策。同时,单株芦苇茎秆横向生长导致茎秆生物量累计更加显著,茎粗与单株地上生物量、单株叶生物量、单株茎秆生物量相关系数分别为 0.518、0.316、0.516 就是有力证明。株高增长反映的是芦苇的茎向生长,其与地上生物量呈极显著正相关,说明在群落水平上株高增长显著影响地上生物量增加。随着株高累积增加,植株逐渐到达生长极限,并由生长盛期转向枯萎,植物组织含水量呈下降趋势,可能也预示着芦苇在生长初期水分依赖性高,生长中后期抵抗水分胁迫能力强,因此株高与植物组织含水量呈极显著负相关。单株展叶数增加,单株叶面积也伴随增长,反映在群落尺度上盖度和地上生物量也相应增加,因而单株展叶数、单株叶面积分别与盖度、地上生物量呈极显著正相关。通过关联芦苇形态特征与群落数量特征,打破了芦苇生活史研究的个体、种群、群落尺度,有利于揭示芦苇生物学特征间与尺度无关的内在规律^[25],为跨尺度研究植物生长发育过程提供了科学启示。

本研究中,在 5~10 月份,各月芦苇株高与地上生物量之间的关系可用幂函数模型或指数函数模型表达,其在生长发育过程中物质和资源分配遵循着规律。随着芦苇株高的增长,地上生物量累积量也相应增加,但生长速率逐渐变缓,因而直观表达出株高与地上生物量拟合效果降低,生长初期株高与地上生物量表现出一定的正相关,之后随着生长速率

的变缓这种正相关趋于减弱并消失。Hermans 等^[26]就认为株高与生物量间的关系对植物生长调节尤为重要。在 6~8 月份,各月茎粗与单株地上生物量拟合方程的 R^2 分别为 0.384 6、0.597 7、0.740 1,随着单株地上生物量累积量越来越大,能量储存也相应增加,茎秆通过横向生长调节,为植株生长繁殖起到物理支撑,有效防止了植株折损,体现了芦苇较强的生态适应策略。

总之,芦苇生长过程中株高与地上生物量、茎粗与单株地上生物量的生长关系变化蕴涵着植物的生存、生长和繁殖的内在法则,这种调节策略进一步影响了群落结构和生态系统土壤碳汇潜力^[27]。值得注意的是,在芦苇生长最盛期(8 月或 9 月),形态指标与生物量指标的拟合效果最佳,除叶长和单株叶生物量外,其余拟合均为幂函数模型,表现为异速生长关系。这种规律在生物界普遍存在^[28],银川市典型湖湿地的芦苇在生长盛期其异速生长关系表达最好,这为芦苇地上生物量指标的预估提供了便捷途径。

3.3 典型湖泊湿地芦苇生长的土壤影响因子

植物生长状况与土壤理化性质密不可分,生境土壤营养元素的多寡显著影响着芦苇的生态特征。在银川湖泊湿地中,土壤 TN、SOC、AN、全盐、pH、AK 均是影响芦苇生长的特征因子,其中土壤 TN、SOC 的因子载荷最高,在芦苇生长发育过程中影响最大,夏贵菊等^[29]也认为土壤 SOC 和 TN 是影响芦苇生物量的决定因子。因此,在银川湖泊芦苇湿地整修中,适当添加有机肥和氮肥,更有利于芦苇生长繁衍,使湖泊芦苇湿地的景观效果和生态功能得

以最大化的发挥。

综上所述,芦苇生长过程呈现明显的季节性规律,在 5~7 月间生长速率快($P<0.05$),在 8~9 月份生长累积速率降缓($P>0.05$),株高、盖度、生物量等指标峰值出现在 8 月份或 9 月份,在 10 月份各生物学指标出现下降或上升($P>0.05$);芦苇种群密度增加,群落环境改变,单株生存空间缩小,抑制了茎秆横向生长,表现为密度与茎粗呈极显著负相关($P<0.01$);单株展叶数增加,单株叶面积也伴随增长,表达在群落尺度盖度和地上生物量也相应增加($P<0.01$);在 5~10 月,各月株高与地上生物量的关系可用幂函数模型或指数函数模型表达,生长初期表现出一定正相关,之后随生长速率变缓这种正相关趋于减弱并消失;在 6~8 月,各月茎粗与单株地上生物量拟合效果依次增加,随单株地上生物量累积量越来越大,茎秆横向生长起到了物理支撑;形态指标与生物量指标在峰值期(8 月或 9 月)的拟合效果最佳,多为幂函数模型,表现为异速生长关系;芦苇立地生境土壤营养元素中,TN、SOC、AN、全盐、pH、AK 均是影响芦苇生长的特征因子,并以 TN、SOC 对芦苇生长发育影响最大。在本研究序列中典型湖泊均属浅水草型湖,是“生态银川”大生态系统的重要组成部分,作为银川城市复合生态系统的生态屏障,直接保障着市域生态安全乃至银川平原绿洲系统稳定。因此,基于自然条件下的原位优势,通过监测芦苇生长动态,应用经典统计学方法,分析探究芦苇生活史策略及土壤基质,为银川市湖泊芦苇湿地恢复与保护建设提供了理论指导,也为西北干旱地区湖泊湿地修复提供了科学示范。

参考文献:

[1] CHAMBERS R M, MCYERSON L A, SALTONATALL K. Expansion of *Phragmites australis* into tidal wetlands of north America[J]. *Aquatic Botany*,1999,**64**(3 /4): 261-273.

[2] 管 博,栗云召,夏江宝,等. 黄河三角洲不同水位梯度下芦苇植被生态特征及其与环境因子相关关系[J]. *生态学杂志*, 2014,**33**(10): 2 633-2 639.

GUAN B, LI Y Z, XIA J B, *et al.* Ecological characteristics of *Phragmites australis* vegetation at different water table levels and their relation to environmental factors in the Yellow River Delta [J]. *Chinese Journal of Ecology*,2014,**33**(10): 2 633-2 639.

[3] KARUNARATNE S, ASAEDA T, YUTANI K. Growth performance of *Phragmites australis* in Japan; influence of geographic gradient[J]. *Environmental and Experimental Botany*,2003,**50**(1): 51-66.

[4] 赵永全,何彤慧,夏贵菊,等. 不同控水条件下芦苇生长与光合特征研究[J]. *西北林学院学报*,2015,**30**(1): 69-74.

ZHAO Y Q, HE T H, XIA G J, *et al.* Growth and photosynthetic characteristics of *Phragmites australis* under different water control conditions[J]. *Journal of Northwest Forestry University*,2015,**30**(1): 69-74.

[5] 李长明,叶小齐,吴 明,等. 水深及共存对芦苇和香蒲生长特征的影响[J]. *湿地科学*,2015,**13**(5): 609-615.

LI C M, YE X Q, WU M, *et al.* Effects of water depth and coexistence on growth characteristics of *Phragmites australis* and *Typha domingensis*[J]. *Wetland Science*,2015,**13**(5): 609-615.

[6] VRETARE V, WEISNER S E B, STRAND J A, *et al.* Phenotypic plasticity in *Phragmites australis* as a functional response to water depth[J]. *Aquatic Botany*,2001,**69**(2-4):127-146.

[7] WANG Q, WANG C H, ZHAO B, *et al.* Effects of growing

- conditions on the growth of and interactions between saltmarsh plants; implications for invasibility of habitats[J]. *Biology Invasions*, 2006, **8**(7): 1547-1560.
- [8] 吴春燕,何彤慧,于 骥,等. 不同盐度对芦苇生长及光合特征的影响[J]. 贵州农业科学, 2016, **44**(6): 18-21.
WU C Y, HE T H, YU J, *et al.* Effects of growth and photosynthetic characteristics of *Phragmites australis* under different salinity concentration[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2016, **44**(6): 18-21.
- [9] 石 冰,马金妍,王开运,等. 崇明东滩围垦芦苇生长、繁殖和生物量分配对大气温度升高的响应[J]. 长江流域资源与环境, 2010, **19**(4): 383-388.
SHI B, MA J Y, WANG K Y, *et al.* Effects of atmospheric elevated temperature in the growth, reproduction and biomass allocation of reclamation *Phragmites australis* in east beach of Chongming Island[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, **19**(4): 383-388.
- [10] 孙胜民,何彤慧,楼晓钦,等. 银川湖泊湿地水生态恢复及综合管理[M]. 北京:海洋出版社, 2012: 9-23.
- [11] MC GRAW J B, GARBUTT K. Demographic growth analysis[J]. *Ecology*, 1990, **71**(3): 1 199-2 004.
- [12] 许秀丽,张 奇,等. 鄱阳湖洲滩芦苇种群特征及其与淹水深度和地下水埋深的关系[J]. 湿地科学, 2014, **12**(6): 714-722
XU X L, ZHANG Q, *et al.* Reed population features and relationships between feature indicators and flooding depth, groundwater depth in An islet in Poyang Lake[J]. *Wetland Science*, 2014, **12**(6): 714-722.
- [13] 崔保山,赵欣胜,等. 黄河三角洲芦苇种群特征对水深环境梯度的响应[J]. 生态学报, 2006, **26**(5): 1 533-1 541.
CUI B S, ZHAO X S, *et al.* The response of reed community to the environment gradient of water depth in the Yellow River Delta[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, **26**(5): 1 533-1 541.
- [14] 王雪宏,佟守正,吕宪国. 半干旱区湿地芦苇种群生态特征动态变化研究——以莫莫格湿地为例[J]. 湿地科学, 2008, **6**(3): 386-391.
WANG X H, TONG S Z, LÜ X G. The ecological characteristics dynamic of *Phragmites australis* community in wetland of Semi-arid Areas—a case of Momoge Wetland[J]. *Wetland Science*, 2008, **6**(3): 386-391.
- [15] 王国生. 芦苇高产栽培技术[J]. 现代农业科技, 2007, (9): 30-31.
WANG G S. High-yield cultivation techniques of reed[J]. *Modern Agricultural Science & Technology*, 2007, (9): 30-31.
- [16] GILMANOW T G, PARTO W J, OJIMA D S. Testing the “CENTURY” ecosystem level model on data sets from eight grassland sites in the former USSR representing a wide climate/soil gradient[J]. *Ecological Modelling*, 1997, **96**: 191-210.
- [17] 孙文广,孙志高,孙景宽,等. 黄河口芦苇湿地不同恢复阶段种群生态特征[J]. 生态学报, 2015, **35**(17): 5 804-5 812.
SUN W G, SUN Z G, SUN J K, *et al.* Ecological traits of *Phragmites australis* community in different restoration phases of the Yellow River estuary, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(17): 5 804-5 812.
- [18] 张佳蕊,张海燕,陆健健. 长江口淡水潮滩芦苇地上与地下部分月生物量变化比较研究[J]. 湿地科学, 2013, **11**(1): 7-12.
ZHANG J R, ZHANG H Y, LU J J. Comparisons of monthly biomass dynamics between aboveground and belowground parts of *Phragmites australis* in freshwater Tidal Flat in Yangtze Estuary[J]. *Wetland Science*, 2013, **11**(1): 7-12.
- [19] 邱 天. 松嫩平原芦苇的生物学和生态学特征[J]. 草业科学, 2014, **31**(2): 300-305.
QIU T. Biological and ecological characterization of *Phragmites australis* in Songnen Prairie[J]. *Pratacultural Science*, 2014, **31**(2): 300-305.
- [20] 陈 哲,周华坤,等. 三江源区不同建群期人工草地甘肃马先蒿生物量分配[J]. 西北植物学报, 2011, **31**(5): 995-1 002.
CHEN Z, ZHOU H K, *et al.* Resource Allocation of *Pedicularis kansuensis* of artificial grassland with different planting dates in Three Rivers Source Regions in Qinghai, China[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.*, 2011, **31**(5): 995-1 002.
- [21] RUZI M, VELASCO J. Nutrient bioaccumulation in *Phragmites australis*: management tool for reduction of pollution in the Mar Menor[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2010, (205): 173-185.
- [22] REICH P B, WRIGHT I J, CAVENDER-BARES J, *et al.* The evolution of plant functional variation: Traits, spectra, and strategies[J]. *International Journal of Plant Sciences*, 2003, (164): S143-S164.
- [23] PÉREZ-HARGUINDEGUY N, DÍAZ S, GARNIER E. New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide[J]. *Australian Journal of Botany*, 2013, (61): 167-234.
- [24] 王国勋,于顺利,方伟伟,等. 植物群落构件的协同性研究进展[J]. 生态学杂志, 2014, **33**(10): 2 824-2 833.
WANG G X, YU S L, FANG W W, *et al.* Research progress and prospects of correlation between plant community modules[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33**(10): 2 824-2 833.
- [25] 程栋梁,钟全林,林茂兹,等. 植物代谢速率与个体生物量关系研究进展[J]. 生态学报, 2011, **31**(8): 2 312-2 320.
CHENG D L, ZHONG Q L, LIN M Z, *et al.* The advance of allometric studies on plant metabolic rates and biomass[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(8): 2 312-2 320.
- [26] HERMANS C H, WHITE P J, VERBRUGGEN N. How do plants respond to nutrient shortage by biomass allocation[J]. *Trends in Plant Science*, 2006, **11**(12): 610-617.
- [27] LITTON C M, RAICH J W, RYAN M G. Carbon allocation in forest ecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2007, **13**(10): 2 089-2 109.
- [28] NIKLAS K J. Plant allometry: is there a grand unifying theory? [J]. *Biological Reviews*, 2004, **79**: 871-889.
- [29] 夏贵菊,何彤慧,赵永全,等. 不同土壤类型对芦苇生长及光合特征的影响[J]. 西北植物学报, 2014, **34**(6): 1 252-1 258.
XIA G J, HE T H, ZHAO Y Q, *et al.* Influence of different soil types on reed growth and photosynthesis characteristics[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.*, 2014, **34**(6): 1 252-1 258.