

引用格式:

姚欣, 边华林, 李有志, 周巧巧. 洞庭湖湿地南荻碳密度及其影响因子分析[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47(5): 547–552.

YAO X, BIAN H L, LI Y Z, ZHOU Q Q. Effects of soil physical and chemical properties on carbon density of *Triarrhena lutarioriparia* in the Dongting Lake wetland[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2021, 47(5): 547–552.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



洞庭湖湿地南荻碳密度及其影响因子分析

姚欣^{1,2}, 边华林¹, 李有志^{1*}, 周巧巧¹

(1.湖南农业大学资源环境学院, 湖南 长沙 410128; 2.洞庭湖区农村生态系统健康湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410128)

摘 要: 以洞庭湖湿地南荻为研究对象, 对 24 个样点进行采样, 测定土壤理化性质以及南荻 6 个器官(穗、叶、茎、根状茎、根、芽)的生物量和碳含量, 分析植物碳密度与土壤理化性质的关系。结果表明: 在南荻各器官中, 茎的生物量最高, 穗的生物量最低; 南荻地上部分的碳含量高于地下部分的; 茎、根、根状茎、叶、芽、穗的碳密度依次降低; 根状茎的碳密度与土壤 pH 及全钾含量、有机质含量呈正回归关系, 与土壤相对湿度和电导率呈负回归关系, 南荻的平均碳密度与土壤全磷含量呈正回归关系; 冗余分析(RDA)结果表明, 第一排序轴与土壤相对湿度呈显著负相关, 与 pH 呈显著正相关; 第二排序轴与土壤全钾含量呈显著正相关。茎是南荻的主要储碳器官, 土壤相对湿度、pH、全磷含量与全钾含量等是影响植物碳密度的主要土壤因子, 应加强土壤保育, 维护湿地碳汇功能。

关 键 词: 南荻; 生物量; 碳密度; 环境因子; 洞庭湖

中图分类号: S543.01

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2021)05-0547-06

Effects of soil physical and chemical properties on carbon density of *Triarrhena lutarioriparia* in the Dongting Lake wetland

YAO Xin^{1,2}, BIAN Hualin¹, LI Youzhi^{1*}, ZHOU Qiaoqiao¹

(1.College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2.Hunan Provincial Key Laboratory of Rural Ecosystem Health in Dongting Lake Area, Changsha, Hunan 410128, China)

Abstract: To understand the carbon density and environmental factors in Dongting Lake wetland, 24 *Triarrhena lutarioriparia* sample points were sampled to determine the biomass, carbon content and soil physical and chemical properties of 6 organs(panicles, leaf, stem, rhizome, root and bud), and analyze the relationship between plant carbon density and soil physical and chemical properties. The results showed that the biomass of stem was the highest and that of panicles was the lowest. The carbon content of above ground part is higher than that of underground part. The results also exhibited that the sequence carbon density of all organs of *Triarrhena lutarioriparia* from high to low was stem, root, rhizome, leaf, bud, panicles. Multiple linear regression analysis concluded that the carbon density of rhizomes had a positive regression relationship with soil pH, soil total K and organic matter content, and a negative regression relationship with soil moisture and electrical conductivity. The average carbon density of *Triarrhena lutarioriparia* had a positive regression relationship with soil total P content. Redundancy analysis(RDA) showed that the first ordination axis had a significant negative correlation with soil moisture and a significant positive correlation with pH. The second ordination axis was significantly

收稿日期: 2020-06-17

修回日期: 2020-07-15

基金项目: 湖南省重点研发计划项目(2019NK2011、2020SK2019); 湖南省教育厅重点项目(19A225)

作者简介: 姚欣(1994—), 女, 湖南邵阳人, 博士研究生, 主要从事环境生态研究, yaoxin6793@163.com; *通信作者, 李有志, 博士, 教授, 主要从事湿地生态与环境研究, liyoushi2004@163.com

positively correlated with soil total K content. In conclusion, the main carbon storage organ of *Triarrhena lutarioriparia* was stem and the main environmental factors affecting plant carbon density were soil moisture, pH, total phosphorus and total potassium contents. Therefore, soil conservation should be strengthened to maintain the carbon sink function of the wetland.

Keywords: *Triarrhena lutarioriparia*; biomass; carbon density; environmental factors; Dongting Lake

随着工业化和城市化的迅速发展,温室气体浓度持续大幅度升高,全球气候环境日益恶化^[1-2]。湿地是全球最大的碳库,湿地植物可以通过光合作用固定大气中的 CO₂,具有较强的固碳、储碳能力,在全球碳循环中具有重要的地位^[3-4]。

植物固碳性能受光照、气温和土壤理化性质的综合影响^[5-6]。安慧等^[7]研究表明,随着光照强度的增加,白车轴草(*Trifolium repens*)生物量逐渐增加,在 400 μmol/(m²·s)光照下固碳能力较高。温度过高,植物叶片气孔的开放性下降,光合作用降低,固碳能力减弱。植物固碳能力还与植物种类、年龄和生物量有关^[8-10]。可见,植物固碳受到众多因素的综合影响,但关键因子尚不明确,需要作进一步探究。

南荻(*Triarrhena lutarioriparia*)为多年生、禾本科荻属草本植物,是洞庭湖湿地面积最大、最为典型的挺水植物,分布面积达 9.05×10⁴ hm²,年产干物质 30~36 t/hm²,且常与芦苇(*Phragmites australis*)混生,形成优势群落^[11-12]。自 20 世纪 60 年代以来,因南荻地上茎含有大量纤维,一直作为造纸的原材料而大面积种植,被认为是一种经济有效的固碳植物。

本研究中,以洞庭湖湿地南荻为研究对象,通过多点采样,测定南荻的生物量、碳含量以及土壤的理化性质,分析植物碳密度与土壤理化性质的关系,旨在阐明影响南荻固碳能力的关键土壤因子,为湿地固碳增汇提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

洞庭湖面积约为 2625 km²(N28°38'~N29°45', E111°40'~E113°10'),北纳长江来水,南和西接湘、资、沅、澧四水。该湖流域属亚热带季风气候,年平均气温 17℃,无霜期有 268 d,年平均降水量 1200~1415 mm,雨季从 4 月延伸到 8 月,平均相对湿度为 80%,平均蒸发量为 1270 mm,水位的年度波动大约为 12~14 m,8 月水位最高,1—2 月水位最低^[13-14],年平均风速为 2.0~3.0 m/s,海拔高

度 28~35 m。

1.2 调查与取样

2016 年 11 月,在洞庭湖湿地选取 24 个南荻典型样点(表 1)。在每个样点,选取 1 m×1 m 的样方进行调查。在每个样方内,采用手持式全球定位系统(GPS)记录经度和纬度。植物地上部分从土壤表面收割,穗、叶、茎分开装袋;挖取植物地下部分,去泥后按根、根状茎和芽分别装袋。每个样方内,采用五点取样法采集 0~30 cm 的混合土壤,装袋带回实验室,备用。

表 1 洞庭湖湿地南荻采样点信息

Table 1 The information of investigated plots of *Triarrhena lutarioriparia* in the Dongting Lake wetland

采样点序号	经度	纬度
1	E113°03'19.0"	N29°26'43.1"
2	E113°00'55.0"	N29°23'6.2"
3	E113°00'18.8"	N29°22'34.9"
4	E113°00'29.7"	N29°21'39.2"
5	E112°46'38.2"	N29°27'40.4"
6	E112°47'23.6"	N29°27'27.9"
7	E112°48'27.4"	N29°25'50.8"
8	E112°48'20.3"	N29°26'2.7"
9	E112°49'26.5"	N29°26'9.1"
10	E112°49'42.6"	N29°26'3.9"
11	E112°49'51.1"	N29°25'14.7"
12	E113°04'4.1"	N29°25'4.4"
13	E113°04'26.9"	N29°24'49.1"
14	E113°02'1.5"	N29°23'39.2"
15	E113°02'26.4"	N29°23'48.4"
16	E113°03'0.8"	N29°24'16.7"
17	E112°50'26.0"	N29°23'23.7"
18	E112°47'10.5"	N29°16'20.5"
19	E112°47'49.8"	N29°16'50.0"
20	E112°47'8.0"	N29°15'25.8"
21	E112°45'43.4"	N29°13'23.5"
22	E112°42'44.5"	N29°07'16.0"
23	E112°42'58.0"	N29°07'25.6"
24	E112°42'20.9"	N29°06'28.4"

1.3 植物生物量和碳含量的测定

将带回实验室的新鲜南荻样品用自来水洗净，105 ℃杀青 30 min，80 ℃烘 48 h 至恒重。每个南荻器官(穗、叶、茎、根状茎、根、芽)的生物量以每平方米的干质量计算，南荻总生物量则为各器官的干质量之和。烘干的南荻样品研磨成粉过筛(孔径 120 μm)，采用重铬酸钾氧化法测定植物碳含量。

1.4 土壤理化性质的测定

将带回实验室的底泥样品自然风干，去除样品中的杂草、石块等杂物，用木棒碾碎后再用玛瑙研钵研磨，过筛，备用。采用烘干法测定土壤的含水量；采用 PHSJ-4A pH 计测定土壤的 pH 值；采用 DDSJ-318 型电导率仪测定土壤电导率；采用重铬酸钾氧化法、凯氏定氮法、硫酸氢溶液稀释滴定法、氢氧化钠碱熔-钼锑抗比色法和盐酸-硫酸浸提法分别测定土壤有机质含量、土壤全氮含量、碱解氮含量、全磷和有效磷含量；采用火焰光度计法(氢氟酸-高氯酸消煮)测定全钾含量。

1.5 数据处理与分析

参照丁壮等^[15]的方法计算南荻生物量碳密度。运用 SPSS V17.0 对南荻各器官的生物量、碳含量和碳密度进行 Turkey’s 单因素方差分析(ANOVA)，显著性水平为 0.05；以南荻碳密度为因变量，土壤理化性质为自变量，进行多元线性回归分析，显著性水平为 0.05；应用 CANOCO 4.5 对南荻碳密度与土壤理化性质进行冗余分析(RDA)。

2 结果与分析

2.1 南荻各器官的生物量分配以及碳密度特征

南荻各器官(根、根状茎、茎、叶、芽和穗)的生物量以及碳密度特征如表 2 所示。从生物量来看，南荻的 6 个器官中，茎的生物量最高(1139.98 g/m²)，其后依次为根、根状茎、叶和芽的，穗的生物量最低(14.14 g/m²)。不同器官中的碳含量有明显差异，地上部分(穗、叶和茎)的碳含量高于地下部分(根、根状茎和芽)的，其中茎的碳含量最高，芽的碳含量最低。植物各器官的碳密度分配特征与生物量的分配特征一致，即茎、根、根状茎、叶、芽、穗的碳密度依次降低。

表 2 洞庭湖湿地南荻各器官的生物量和碳含量及碳密度

Table 2 Plant biomass and carbon concentration and carbon density in the organs of *Triarrhena lutarioriparia* in the Dongting Lake wetland

器官	生物量/(g·m ⁻²)	碳含量/(mg·g ⁻¹)	碳密度/(g·m ⁻²)
穗	(14.14±6.84)a	(483.98±45.82)c	(6.84±3.14)a
叶	(133.94±99.72)b	(407.64±17.24)b	(54.60±40.65)b
茎	(1139.98±474.42)d	(480.03±20.85)c	(547.22±222.57)e
根状茎	(522.17±499.31)c	(398.42±18.33)b	(208.04±188.01)c
根	(822.39±424.11)d	(345.70±63.33)a	(284.30±150.55)d
芽	(84.17±36.80)b	(341.75±38.24)a	(28.77±14.02)b

同列数据不同字母表示差异显著(P<0.05)。

2.2 南荻碳密度和土壤理化性质的多元线性回归分析

由表3可知，南荻穗、叶、茎、根、芽的碳密度与土壤理化性质之间均无显著相关关系；根状茎

表 3 南荻碳密度和土壤理化性质的线性回归分析结果

Table 3 Line regression between carbon density in *Triarrhena lutarioriparia* and soil physical and chemical properties

土壤理化性质	回归系数						
	穗	叶	茎	芽	根	根状茎	总值
常量	-32.679	812.869	3806.330	-390.993	-1390.354	-6530.110	-3724.857
土壤相对湿度	-0.439	-3.438	0.240	-0.886	6.123	-37.583	-35.984
土壤 pH	3.822	-54.015	-325.441	34.804	74.569	539.218	272.949
土壤电导率	-0.006	-0.146	0.433	-0.106	-0.193	-1.543	-1.561
土壤碱解氮含量	0.120	-1.913	-6.843	0.455	2.058	9.855	3.730
土壤全氮含量	-10.813	174.110	256.898	-29.793	-121.032	-1158.250	-888.867
土壤有效磷含量	-0.222	3.926	20.791	-0.859	-12.379	-22.313	-11.054
土壤全磷含量	4.108	-77.813	879.843	60.494	1081.980	949.497	2898.121
土壤全钾含量	0.783	-8.702	-51.156	5.993	16.849	132.518	96.285
土壤有机质含量	0.265	-0.791	-6.317	0.736	-7.514	43.248	29.628
R ²	0.109	0.205	0.324	0.407	0.230	0.555	0.415
P	0.991	0.915	0.666	0.439	0.875	0.129	0.420

表 3(续)

土壤理化性质	<i>t</i>						总值
	穗	叶	茎	芽	根	根状茎	
常量	-0.571	1.162	1.003	-1.877	-0.545	-2.697	-0.710
土壤相对湿度	-1.187	-0.759	0.010	-0.657	0.371	-2.399*	-1.059
土壤 pH	0.785	-0.907	-1.008	1.964	0.344	2.617*	0.611
土壤电导率	-0.363	-0.724	0.395	-1.759	-0.262	-2.204*	-1.029
土壤碱解氮含量	0.731	-0.951	-0.628	0.759	0.281	1.416	0.247
土壤全氮含量	-0.648	0.854	0.232	-0.491	-0.163	-1.641	-0.581
土壤有效磷含量	-0.525	0.761	0.743	-0.559	-0.658	-1.249	-0.285
土壤全磷含量	0.271	-0.419	0.874	1.095	1.600	1.478	2.081*
土壤全钾含量	0.788	-0.716	-0.777	1.657	0.381	3.152**	1.056
土壤有机质含量	0.590	-0.144	-0.212	0.449	-0.375	2.270*	0.717

t 为对回归系数的显著性检验; “*” 示 0.05 水平下差异显著, “**” 示 0.01 水平下差异极显著。

的碳密度与土壤全钾含量呈极显著正相关关系,与土壤 pH、有机质含量呈显著正相关关系,与土壤相对湿度和电导率呈显著负相关。从整体上看,南荻平均碳密度与土壤全磷含量呈显著正回归关系。

2.3 南荻碳密度与土壤理化性质的 RDA 分析

南荻碳密度与土壤理化性质的 RDA 分析结果(表 4)显示,前两个排序轴分别解释了碳密度数据的 32.3% 和 41.5%,解释了碳密度与土壤理化性质相关性关系的 75.6% 和 97.5%。第一排序轴的特征值显著高于第二排序轴的,据此可判断碳密度主要受第一排序轴因子控制。第一排序轴与土壤相对湿度呈显著负相关,与土壤 pH 呈显著正相关;第二排序轴与土壤全钾含量呈显著正相关。南荻各器官的

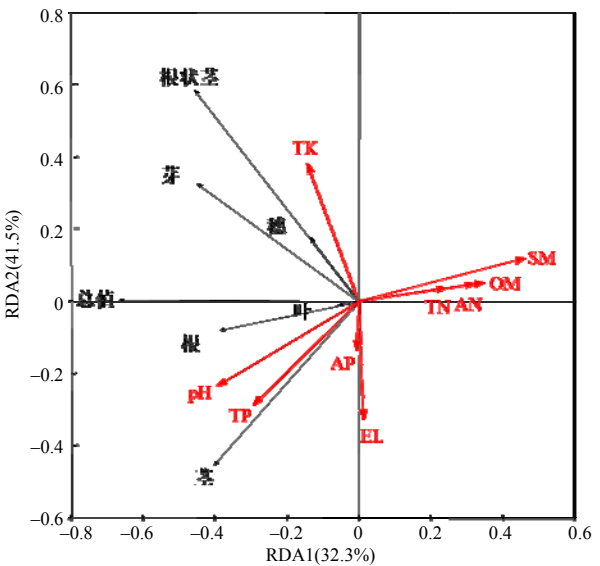
表 4 洞庭湖湿地南荻碳密度与土壤理化性质的冗余分析结果

Table 4 Redundancy analysis on the correlations between carbon densities in *Triarrhena lutarioriparia* and soil physical and chemical properties in the Dongting Lake wetland

土壤性质	第一轴	第二轴
土壤相对湿度	-0.460 4*	0.118 3
土壤 pH	0.393 8*	-0.235 5
土壤电导率	0.013 5	-0.326 6
土壤碱解氮含量	0.320 7	0.047 9
土壤全氮含量	0.242 0	0.036 3
土壤有效磷含量	-0.005 4	-0.135 2
土壤全磷含量	-0.292 9	-0.287 5
土壤全钾含量	-0.142 1	0.378 9*
土壤有机质含量	0.346 9	0.049 8
特征值	0.322	0.093
碳密度-土壤性质相关性	0.677	0.636
累计可解释的碳密度数据的百分比	32.3%	41.5%
累计可解释的碳密度-土壤性质关系百分比	75.6%	97.5%

“*” 示在 0.05 水平差异显著。

碳密度与土壤理化性质的 RDA 排序如图 1 所示。从图 1 可知,根、茎、叶与土壤 pH、全磷含量呈正相关;根状茎、穗与土壤全钾呈正相关;碳密度与土壤相对湿度、有机质含量、碱解氮含量以及全氮含量呈负相关。



SM、pH、EL、AN、TN、AP、TP、TK、OM 分别示土壤相对湿度、土壤 pH、土壤电导率、土壤碱解氮含量、土壤全氮含量、土壤有效磷含量、土壤全磷含量、土壤全钾含量、有机质含量。

图 1 南荻碳密度与土壤理化性质的 RDA 排序结果

Fig.1 Redundancy analysis plots of carbon densities in *Triarrhena lutarioriparia* and soil physical and chemical properties

3 结论与讨论

目前,植被生物量是分析植被生产力和固碳能力的一个重要指标^[16]。本研究中,从洞庭湖湿地南荻各器官的生物量来看,茎的生物量最高,其后依次为根、根状茎、叶和芽的,穗的最低。最优分配理论认为,植物会将资源分配到最需要的器官中,

从而使得植物能够更有效地获取最稀缺的资源^[17]。然而洞庭湖地区水位呈现周期性的季节变化,在一定的水淹环境下,南荻为了获得更多的光照资源,将尽可能多的养分资源分配到茎中,促使茎节快速生长,致使茎部生物量占比较高^[18]。植物的储碳能力不仅取决于植物的生物量,还取决于植物单位面积的碳密度。从洞庭湖湿地南荻各器官的碳密度来看,南荻碳密度与生物量的分配规律一致,茎的碳密度最高,穗的碳密度最低,表明碳密度与生物量之间密切相关。研究^[19]表明,当碳含量在一定幅度内,生物量是碳密度的主导因子,生物量的快速增长迅速增加了植被层生物量碳的积累,即生物量大,则碳密度亦大。然而,南荻生长迅速,容易繁殖且生物量大,使得其在生物量和碳储量的累积上蕴藏着巨大的潜力^[20]。

湿地土壤作为植物生长的重要物质基础,其土壤理化性质的差异会直接影响湿地植物群落的生长、分布和物种多样性,进而影响植被的储碳、固碳能力^[21]。多元线性回归分析表明,南荻的穗、叶、茎、根和芽的碳密度与土壤理化性质均无显著性回归关系,而根状茎碳密度与土壤 pH、全钾含量、有机质含量呈显著正回归关系,南荻总碳密度与土壤全磷含量呈显著正回归关系。南荻为禾本科多年生草本植物,可通过延伸建立新的碎片状根状茎,从而促进种群迅速扩大;因此,根状茎被认为是碳和营养物质储存的重要器官^[12]。较高的土壤有机质含量可以提供有机化学物质,并通过增加交换能力来增强植物对营养的吸收^[22-24]。植物根系会吸收大量的钾元素,这是由于钾元素大部分是以离子状态存在,且活性很强,容易向土壤下层淋溶,易被吸收;因此,土壤有机质含量以及全钾含量增大会导致南荻根状茎碳密度增大。对土壤 pH 而言,石洪华等^[24]研究发现,当土壤偏碱性(pH=7.7)时,北长山岛黑松纯林乔木层碳储量较低。而本研究发现,南荻根状茎碳密度与土壤 pH 呈显著正回归关系,这可能是由于南荻的耐碱性^[25-26]所致。本研究中,南荻总碳密度与土壤全磷含量呈显著正回归关系,与其他养分无明显相互关系,这可能是在湿地生态系统中,植物生长所需要的养分除了来自于土壤外,还有一部分是来自于水体,从而导致植物碳密度与土壤养分关系较弱。

有研究^[27-29]表明,土壤含水量过高或过低会抑制植物的生长。戚志伟等^[30]探讨了芦苇生态特征和电导率的关系,发现土壤电导率与芦苇生态特征呈显著负相关,在较低的土壤电导率下,芦苇生长状况表现为高密度、高生物量,从而也提高了植物的储碳能力。本研究中,根状茎碳密度与土壤相对湿度和电导率呈显著负回归关系,与戚志伟等^[30]的研究结果一致。RDA 分析结果表明,土壤相对湿度、pH、全钾含量是影响植物碳密度的重要因子。可见,湿地植物固碳特性比较复杂,除了土壤理化性质以外,还需要结合湿地特殊的水文条件综合考虑。

参考文献:

- [1] ARTUSO F, CHAMARD P, PIACENTINO S, et al. Influence of transport and trends in atmospheric CO₂ at Lampedusa[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(19): 3044-3051.
- [2] 杜虎, 宋同清, 曾馥平, 等. 喀斯特峰丛洼地不同植被类型碳格局变化及影响因子[J]. *生态学报*, 2015, 35(14): 4658-4667.
DU H, SONG T Q, ZENG F P, et al. Carbon storage and its controlling factors under different vegetation types in depressions between karst hills, southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(14): 4658-4667.
- [3] SCHOLLES R J, NOBLE I R. Storing carbon on land[J]. *Science*, 2001, 294: 1012-1013.
- [4] KAYRANLI B, SCHOLZ M, MUSTAFA A, et al. Carbon storage and fluxes within freshwater wetlands: a critical review[J]. *Wetlands*, 2010, 30(1): 111-124.
- [5] POORTER H, NAGEL O. The role of biomass allocation in the growth response of plants to different levels of light, CO₂, nutrients and water: a quantitative review[J]. *Australian Journal of Plant Physiology*, 2000, 27(6): 596-607.
- [6] 马晔, 刘锦春. $\delta^{13}\text{C}$ 在植物生态学研究中的应用[J]. *西北植物学报*, 2013, 33(7): 1492-1500.
MA Y, LIU J C. Applications of $\delta^{13}\text{C}$ in plant ecological research[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2013, 33(7): 1492-1500.
- [7] 安慧, 上官周平. 光照强度和氮水平对白三叶幼苗生长与光合生理特性的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29(11): 6017-6024.
AN H, SHANGGUAN Z P. Effects of light intensity and nitrogen application on the growth and photosynthetic characteristics of *Trifolium repens* L. [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(11): 6017-6024.
- [8] 刘钰, 李秀珍, 闫中正, 等. 长江口九段沙盐沼湿地芦苇和互花米草生物量及碳储量[J]. *应用生态学报*,

- 2013, 24(8): 2129–2134.
- LIU Y, LI X Z, YAN Z Z, et al. Biomass and carbon storage of *Phragmites australis* and *Spartina alterniflora* in Jiudian shoal wetland of Yangtze Estuary, East China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(8): 2129–2134.
- [9] 兰斯安, 杜虎, 曾馥平, 等. 不同林龄杉木人工林碳储量及其分配格局[J]. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1125–1134.
- LAN S A, DU H, ZENG F P, et al. Carbon storage and allocation in *Cunninghamia lanceolata* plantations with different stand ages[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(4): 1125–1134.
- [10] 李典鹏, 孙涛, 姚美思, 等. 盐湖区生态系统碳密度及其分配格局[J]. 干旱区研究, 2018, 35(4): 984–991.
- LI D P, SUN T, YAO M S, et al. Carbon density and its distribution pattern of ecosystem in saline region[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(4): 984–991.
- [11] 鲁敏, 秦碧莲, 牛朝阳, 等. 城市植物与绿地固碳释氧能力研究进展[J]. 山东建筑大学学报, 2015, 30(4): 363–369.
- LU M, QIN B L, NIU C Y, et al. Research progress of the ability of carbon sequestration and oxygen release of urban plant and green space[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2015, 30(4): 363–369.
- [12] 李旭, 宋冰冰, 李峰, 等. 洞庭湖不同水位高程下南荻(*Triarrhena lutarioriparia*)种群分布格局及生长动态[J]. 湖泊科学, 2016, 28(5): 1039–1046.
- LI X, SONG B B, LI F, et al. Population distribution patterns and growing status of *Triarrhena lutarioriparia* along a gentle elevation gradient of Lake Dongting wetlands[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(5): 1039–1046.
- [13] XIE Y H, TANG Y, CHEN X S, et al. The impact of Three Gorges Dam on the downstream eco-hydrological environment and vegetation distribution of East Dongting Lake[J]. Ecohydrology, 2015, 8(4): 738–746.
- [14] HU C, DENG Z M, XIE Y H, et al. The risk assessment of sediment heavy metal pollution in the East Dongting Lake wetland[J]. Journal of Chemistry, 2015, 2015: 1–8.
- [15] 丁壮, 崔若光. 红松人工林生物量碳密度[J]. 东北林业大学学报, 2018, 46(2): 17–21.
- DING Z, CUI R G. Biomass carbon density of Korean pine plantations[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2018, 46(2): 17–21.
- [16] 常雄凯, 曾辉, 刘森. 黄渤海滨海湿地植被类型、生物量及其与土壤环境因子的关系[J]. 生态学报, 2018, 37(11): 3298–3304.
- CHANG X K, ZENG H, LIU M. Relationships among vegetation types, biomass and soil environmental factors in the wetlands of Yellow Sea and Bohai coastal areas[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(11): 3298–3304.
- [17] MCCARTHY M C, ENQUIST B J. Consistency between an allometric approach and optimal partitioning theory in global patterns of plant biomass allocation[J]. Functional Ecology, 2007, 21(4): 713–720.
- [18] STRAND J A, WEISNER S E B. Morphological plastic responses to water depth and wave exposure in an aquatic plant (*Myriophyllum spicatum*)[J]. Journal of Ecology, 2001, 89(2): 166–175.
- [19] 郑帷婕, 包维楷, 辜彬, 等. 陆生高等植物碳含量及其特点[J]. 生态学杂志, 2007, 26(3): 307–313.
- ZHENG W J, BAO W K, GU B, et al. Carbon concentration and its characteristics in terrestrial higher plants[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(3): 307–313.
- [20] 吴超, 陈心脏, 邹业爱, 等. 不同水位和刈割处理对南荻生长和生理的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2018, 44(3): 290–294.
- WU C, CHEN X S, ZOU Y A, et al. Effects of different water levels and cutting treatments on the growth and physiology of *Miscanthus lutarioriparius*[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2018, 44(3): 290–294.
- [21] 谢琳萍, 王敏, 王保栋, 等. 莱州湾滨海柽柳林湿地植被碳储量的分布特征及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2017, 28(4): 1103–1111.
- XIE L P, WANG M, WANG B D, et al. Distribution pattern and influencing factors of vegetation carbon storage of *Tamarix chinense* in the coastal wetland of Laizhou Bay, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(4): 1103–1111.
- [22] VEGA F A, COVELO E F, ANDRADE M L, et al. Relationships between heavy metals content and soil properties in minesoils[J]. Analytica Chimica Acta, 2004, 524(1/2): 141–150.
- [23] ZENG F R, ALI S, ZHANG H T, et al. The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants[J]. Environmental Pollution, 2011, 159(1): 84–91.
- [24] 石洪华, 王晓丽, 王媛, 等. 北长山岛森林乔木层碳储量及其影响因子[J]. 生态学报, 2013, 33(19): 6363–6372.
- SHI H H, WANG X L, WANG A, et al. Storage and drivers of forests carbon on the Beichangshan Island of Miaodao Archipelago[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(19): 6363–6372.

(下转第 570 页)

- LI X J, QIAN K, LIU L Q, et al. Screening and annotation of differentially expressed genes in longissimus muscle of different pig breeds based on RNA-seq technology[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2016, 44(6): 1-8.
- [23] 黄万龙, 张秀秀, 李媛, 等. 利用 RNA-seq 技术筛选大白猪皮下和肌内脂肪组织差异表达基因[J]. 遗传, 2017, 39(6): 501-511.
- HUANG W L, ZHANG X X, LI A, et al. Identification of differentially expressed genes between subcutaneous and intramuscular adipose tissue of Large White pig using RNA-seq[J]. Hereditas, 2017, 39(6): 501-511.
- [24] 钱辉. 利用表达谱芯片技术研究中外猪种不同时期肌肉组织中的表达差异基因[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.
- QIAN H. Microarray analysis of skeletal muscle at four stages in Yorkshire and Meishan pigs[D]. Wuhan:
- Huazhong Agricultural University, 2012.
- [25] MAEDA K, UYSAL K T, MAKOWSKI L, et al. Role of the fatty acid binding protein mall in obesity and insulin resistance[J]. Diabetes, 2003, 52(2): 300-307.
- [26] 李明洲, 李学伟, 朱砺, 等. 猪背最长肌中肌肉生长和脂肪沉积相关基因的差异表达和主成分分析[J]. 中国生物化学与分子生物学报, 2008, 24(1): 46-54.
- LI M Z, LI X W, ZHU L, et al. Differential expression and principal component analysis of genes related to muscle growth and adipose deposition in porcine longissimus dorsi muscle[J]. Chinese Journal of Biochemistry and Molecular Biology, 2008, 24(1): 46-54.
- 责任编辑: 邹慧玲
英文编辑: 柳 正
-
- (上接第 552 页)
- [25] 宗俊勤, 陈静波, 聂东阳, 等. 我国不同地区芒和荻种质资源抗盐性的初步评价[J]. 草地学报, 2011, 19(5): 803-807.
- ZONG J Q, CHEN J B, NIE D Y, et al. Preliminary evaluation on salinity tolerance of *Miscanthus sinensis* Anderss. and *M. sacchariflorus*(Maxim.) Benth. of China[J]. Acta Agrestia Sinica, 2011, 19(5): 803-807.
- [26] 李强, 李加鹏, 何淼. 荻实生苗生物构件对土壤水分胁迫的响应[J]. 草业科学, 2013, 30(6): 893-897.
- LI Q, LI J P, HE M. Study on the adaptability of *Misconstrues sacchariflorus* biological components to soil water stress[J]. Pratacultural Science, 2013, 30(6): 893-897.
- [27] 吴琴, 尧波, 幸瑞新, 等. 鄱阳湖典型湿地土壤有机碳分布及影响因子[J]. 生态学杂志, 2012, 31(2): 313-318.
- WU Q, YAO B, XING R X, et al. Distribution pattern of soil organic carbon in Poyang Lake wetland and related affecting factors[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(2): 313-318.
- [28] 胡佳宇, 谢永宏, 李峰, 等. 东洞庭湖丁字堤苔草群落特征及其影响因子[J]. 应用生态学报, 2014, 25(3): 745-751.
- HU J Y, XIE Y H, LI F, et al. Characteristics of *Carex brevicuspis* and its impact factors in Dingzidi, East Dongting Lake[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(3): 745-751.
- [29] 谢深喜, 刘强, 熊兴耀, 等. 水分胁迫对柑橘光合特性的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2010, 36(6): 653-657.
- XIE S X, LIU Q, XIONG X Y, et al. Effect of water stress on *Citrus* photosynthesis characteristic[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2010, 36(6): 653-657.
- [30] 戚志伟, 高艳娜, 樊同, 等. 崇明东滩围垦湿地芦苇生态特征与水盐因子的关系[J]. 应用与环境生物学报, 2016, 22(5): 739-746.
- QI Z W, GAO Y N, FAN T, et al. Relationship between ecological characteristics of *Phragmites australis* and water-salt indicators in the reclaimed wetland at Dongtan of Chongming Island, China[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2016, 22(5): 739-746.
- 责任编辑: 毛友纯
英文编辑: 柳 正