

AMI (职院刊) 核心期刊

RCCSE中国核心学术期刊 (A)

中国学术期刊影响因子年报统计源期刊

《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊

美国《化学文摘》数据库收录

ISSN 2095-7300

CN 43-1522/Q

# 湖南生态科学学报

## Journal of Hunan Ecological Science

湖南生态科学学报

第十一卷  
Vol. 11  
第2期  
No. 2

二〇二四年六月

2024 第11卷 第2期  
VOL.11 NO.2



# 《湖南生态科学学报》第二届编辑委员会

主任委员：苏 立

副主任委员：庾庐山

主 编：梁忠厚 颜晓元

副主编：蒋一锄

编 委（按姓氏拼音为序）：

白军红	北京师范大学	陈功锡	吉首大学
陈光才	中国林业科学院亚热带林业研究所	陈旭辉	沈阳农业大学
陈永忠	湖南省林业科学院	邓明华	云南农业大学
丁 凡	沈阳农业大学	杜辉辉	湖南农业大学
范 适	湖南环境生物职业技术学院	方 迪	南京农业大学
付美云	湖南环境生物职业技术学院	何铁光	广西壮族自治区农业科学院
胡永灵	湖南环境生物职业技术学院	姜小文	湖南环境生物职业技术学院
李芳柏	广东省科学院生态环境与土壤研究所	刘爱民	安徽师范大学
刘惠芬	天津农学院	刘菊华	海南大学
刘鸣达	沈阳农业大学	刘卫东	中南林业科技大学
柳开楼	江西省红壤及种质资源研究所	彭佩钦	中南林业科技大学
圣倩倩	南京林业大学	谭志远	华南农业大学
汪思龙	中国科学院沈阳应用生态研究所	汪 洋	湖北生态工程职业技术学院
王金龙	天津农学院	王克林	中国科学院亚热带农业生态研究所
王晓明	湖南省林业科学院	王旭军	湖南省林业科学院
魏甲彬	湖南环境生物职业技术学院	温小荣	南京林业大学
文锦芬	昆明理工大学	吴艳宏	中国科学院成都山地所
武攀峰	江苏省南通环境监测中心	杨 华	湖南农业大学
杨 宁	湖南环境生物职业技术学院	易 诚	衡阳师范学院
易镇邪	湖南农业大学	于飞海	台州学院
曾长立	江汉大学	湛方栋	云南农业大学
张少良	东北农业大学	郑冠宇	南京农业大学
钟金凤	湖南环境生物职业技术学院	周国英	中南林业科技大学
周立祥	南京农业大学	周顺桂	福建农林大学
周尧治	西藏农牧学院	朱校奇	湖南省农业科学院

## 声 明

本刊已许可《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司等单位在其网络及系列数据库产品，以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。以上单位的著作权使用费与本刊稿酬，已从论文发表应收取的审稿费和版面费中扣除，不再另付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意上述声明。

目次

研究论文

不同基质对‘丹红紫叶’紫薇容器苗开花和光合特性的影响  
..... 王湘莹,魏溧姣,潘子曦,付美云,唐丽,曾慧杰,陈艺,李永欣,王小明(1)

西南喀斯特和非喀斯特地区典型植物叶片养分特征 ..... 刘清扬,王忠诚(10)

石板菜内生固氮菌分离鉴定及促生特性 ..... 梁春婵,李妙贤,谭德东,黄洁娜,苏坤朋,谭志远(18)

五种松属树种针叶长度与叶水力功能、结构的关系  
..... 王娜,曾海斌,高国强,胡文萍,彭震东,桂佳乐,胡婷,周畅(26)

湖南省兰科植物新记录种——线柱兰 ..... 孙小军,杨振宇,杨彦捷,吴磊(35)

湖南南山国家公园野生乡土地被植物资源评价体系的构建及应用 ..... 许凌云,杨满元,杨宁(38)

青牛胆光合特性对遮阴的响应研究 ..... 杨欣霖,曹基武,谢乔颖,彭翠英,王旭军(51)

配方施肥对高肥力区凹叶厚朴生长及药用成分的影响  
..... 王湘莹,乔中全,王小明,曾慧杰,蔡能,陈艺,李永欣,刘思思(60)

长江流域棉花高效益间作模式筛选  
..... 傅淋,陈岱卉,贺璐,何顺,李玉芳,匡政成,陈泽南,肖才升,李庠,李飞,巩养仓(68)

商丘市冬小麦晚霜冻灾害综合风险分析 ..... 陈博文,邱美娟,檀艳静,任伟(76)

基于降水距平百分率的驻马店市夏玉米主要生育期干旱风险分析  
..... 任伟,邱美娟,檀艳静,陈博文(85)

怀化市森林、草原、湿地生态系统外来入侵物种调查结果与防控策略  
..... 杨万里,谭祥丰,欧阳胜利,杨善为,杨兴,艾莉,冯娜,瞿喜娥(92)

怀化市古树名木资源特征分析 ..... 向继红,向宇(104)

研究综述

辣椒果实辣椒素类物质生物合成分子遗传学研究进展  
..... 邓明华,邓巧玲,华玮,张明先,王华素,黄尧瑶,王岩岩,赵凯,吕俊恒(111)

油料作物联合外源添加物强化重金属污染农田修复效果的研究进展  
..... 康建国,邹冬生,肖智华,曾清如,熊婕,莫莹莹(121)

CONTENTS

Research paper

Effects of Different Substrates on Flowering and Photosynthetic Characteristics of *Lagerstroemia indica* ‘Ebony Embers’ Container Seedlings ..... WANG Xiangying, WEI Lijiao, PAN Zixi, FU Meiyun, TANG Li, ZENG Huijie, CHEN Yi, LI Yongxin, WANG Xiaoming(1)

Nutrient Characteristics of Typical Plant Leaves in Karst and Non-karst Regions of Southwest China ..... LIU Qingyang, WANG Zhongcheng(10)

Identification and Growth Promotion Characteristics of Endophytic Nitrogen Fixing Bacteria from *Sedum emarginatum* ..... LIANG Chunchan, LI Miaoxian, TAN Dedong, HUANG Jiena, SU Kunpeng, TAN Zhiyuan(18)

Correlations between Needle Length and Leaf Hydraulics, Structure in Five *Pinus* Species ..... WANG Na, ZENG Haibin, GAO Guoqiang, HU Wenping, PENG Zhendong, GUI Jiale, HU Ting, ZHOU Chang(26)

*Zeuxine strateumatica*, a New Record Species of Orchidaceae in Hunan Province ..... SUN Xiaojun, YANG Zhenyu, YANG Yanjie, WU Lei(35)

Construction and Application of a Comprehensive Evaluation System for Wild Native Groundcover Plant Resources in Nanshan National Park of Hunan Province ..... XU Lingyun, YANG Manyuan, YANG Ning(38)

Study on the Response of Photosynthetic Characteristics of *Tinospora sagittata* to Shading ..... YANG Xinlin, CAO Jiwu, XIE Qiaoying, PENG Cuiying, WANG Xujun(51)

The Effect of Nitrogen, Phosphorus, and Potassium Formula Fertilization on the Growth and Medicinal Component Content of *Magnolia officinalis* var. *biloba* in High Fertility Areas ..... WANG Xiangying, QIAO Zhongquan, WANG Xiaoming, ZENG Huijie, CAI Neng, CHEN Yi, LI Yongxin, LIU Sisi(60)

Selection of High Benefit Intercropping Patterns for Cotton in the Yangtze River Basin ..... FU Lin, CHEN Daihui, HE Lu, HE Shun, LI Yufang, KUANG Zhengcheng, CHEN Zenan, XIAO Caisheng, LI Xiang, LI Fei, GONG Yangcang(68)

Comprehensive Risk Analysis of Late Frost Disasters to Winter Wheat in Shangqiu City ..... CHEN Bowen, QIU Meijuan, TAN Yanjing, REN Wei(76)

Drought Risk Analysis of Main Growth Periods of Summer Maize in Zhumadian City Based on the Precipitation Anomaly Percentage ..... REN Wei, QIU Meijuan, TAN Yanjing, CHEN Bowen(85)

Investigation Results and Control Strategies of Invasive Alien Species in Forest, Grassland and Wetland Ecosystem of Huaihua City ..... YANG Wanli, TAN Xiangfeng, OUYANG Shengli, YANG Shanwei, YANG Xing, AI Li, FENG Na, QU Xi'e(92)

Analysis of the Characteristics of Ancient and Famous Tree Resources in Huaihua City ..... XIANG Jihong, XIANG Yu(104)

Research review

Advances in Molecular Genetics of Biosynthesis of Capsaicinoids in Capsicum Fruit ..... DENG Minghua, DENG Qiaoling, HUA Wei, ZHANG Mingxian, WANG Huasu, HUANG Yaoyao, WANG Yanyan, ZHAO Kai, LV Junheng(111)

Research Progress on Enhancing the Remediation Effect of Heavy Metal-Polluted Farmland through the Combined Application of Oilseed Crops and Exogenous Additives ..... KANG Jianguo, ZOU Dongsheng, XIAO Zhihua, ZENG Qingru, XIONG Jie, MO Yingying(121)

CK、T12 处理进入末花期时间最早。可见,圃地土、泥炭、珍珠岩、蛭石适当混配的基质有利于‘丹红紫叶’紫薇容器苗开花和花期延长,以 T11 处理基质的效果最佳。

表2 不同基质对‘丹红紫叶’紫薇容器苗花期的影响

Table 2 Effects of different substrates on the flowering time of *Lagerstroemia indica* ‘Ebony Embers’ container seedlings

处理	初花期时间 (月-日)	盛花期时间 (月-日)	末花期时间 (月-日)	平均花期
CK	7-18	7-22	9-15	58.67±1.25 <sup>l</sup>
T1	7-18	7-28	9-21	65.33±0.47 <sup>jk</sup>
T2	7-8	7-20	9-22	76.00±0.82 <sup>c</sup>
T3	7-12	7-18	9-19	68.67±1.70 <sup>ghi</sup>
T4	7-13	7-22	9-22	71.00±1.63 <sup>defg</sup>
T5	7-12	7-18	9-28	78.33±0.47 <sup>b</sup>
T6	7-11	7-20	9-17	68.33±2.06 <sup>hi</sup>
T7	7-12	7-22	9-23	73.00±0.82 <sup>d</sup>
T8	7-12	7-20	9-22	71.67±0.94 <sup>de</sup>
T9	7-14	7-20	9-25	73.33±0.00 <sup>d</sup>
T10	7-14	7-22	9-23	71.33±2.06 <sup>def</sup>
T11	7-11	7-15	10-2	82.33±0.94 <sup>a</sup>
T12	7-12	7-18	9-15	64.67±2.50 <sup>k</sup>
T13	7-10	7-12	9-18	70.00±1.63 <sup>efgh</sup>
T14	7-10	7-22	9-16	67.67±1.25 <sup>hi</sup>
T15	7-13	7-20	9-18	67.33±2.63 <sup>ij</sup>
T16	7-11	7-15	9-18	69.00±2.16 <sup>fg</sup>

### 2.1.2 不同基质对容器苗花径和花序的影响

由表3可知,不同基质对‘丹红紫叶’紫薇容器苗的花径和花序影响达到显著性差异水平( $P < 0.05$ )。T5 处理的花径最大,其次是 T11 处理,分别比 CK 显著增大 23.65%、22.63% ( $P < 0.05$ );CK 的花径最小,除 T6、T12、T13、T16 处理与 CK 不存在显著性差异外( $P > 0.05$ ),其他处理的花径均显著大于 CK ( $P < 0.05$ )。可见,T5、T11 处理有利于花径生长,CK、T6、T12、T13、T16 处理对于花径增长的效果不佳。T11 处理的花序长和宽最大,分别比 CK 显著增大 26.40%、30.20% ( $P < 0.05$ );T10 处理花序长度和 T8 处理花序宽度均最小,它们均小于 CK,且

与 CK 差异均不显著( $P > 0.05$ )。可见,T11 处理有利于花序的生长,开花品质更好。

表3 不同基质对‘丹红紫叶’紫薇容器苗花径和花序的影响

Table 3 Effects of different substrates on the flower diameter and inflorescence of *Lagerstroemia indica* ‘Ebony Embers’ container seedlings

处理	花径/mm	花序长/mm	花序宽/mm
CK	28.24±2.66 <sup>e</sup>	102.05±29.43 <sup>bed</sup>	94.73±28.06 <sup>bed</sup>
T1	33.55±2.92 <sup>abc</sup>	96.71±19.99 <sup>bed</sup>	97.68±18.00 <sup>bed</sup>
T2	32.32±2.69 <sup>abcd</sup>	113.9±27.06 <sup>ab</sup>	111.03±27.16 <sup>abc</sup>
T3	31.64±1.62 <sup>abcd</sup>	86.84±17.43 <sup>cd</sup>	84.99±18.23 <sup>d</sup>
T4	32.24±2.54 <sup>abcd</sup>	98.80±21.91 <sup>bed</sup>	89.98±13.57 <sup>cd</sup>
T5	34.92±3.02 <sup>a</sup>	114.90±27.02 <sup>ab</sup>	117.43±23.94 <sup>ab</sup>
T6	30.41±3.90 <sup>cde</sup>	107.45±12.47 <sup>abcd</sup>	112.28±21.16 <sup>abc</sup>
T7	33.16±3.80 <sup>abcd</sup>	99.75±18.13 <sup>bed</sup>	98.46±19.87 <sup>bed</sup>
T8	34.49±3.35 <sup>ab</sup>	97.87±16.49 <sup>bed</sup>	81.26±21.75 <sup>d</sup>
T9	33.52±1.96 <sup>abc</sup>	101.00±19.70 <sup>bed</sup>	92.47±18.04 <sup>cd</sup>
T10	33.44±1.79 <sup>abc</sup>	85.22±17.00 <sup>d</sup>	86.40±14.94 <sup>d</sup>
T11	34.63±2.34 <sup>ab</sup>	128.99±10.57 <sup>a</sup>	123.34±16.38 <sup>a</sup>
T12	29.83±2.44 <sup>de</sup>	101.68±9.64 <sup>bed</sup>	104.30±18.47 <sup>abcd</sup>
T13	31.11±3.18 <sup>cde</sup>	116.77±20.06 <sup>ab</sup>	102.84±18.46 <sup>abcd</sup>
T14	32.92±2.72 <sup>abcd</sup>	109.00±22.03 <sup>abc</sup>	104.31±21.67 <sup>abcd</sup>
T15	33.07±3.52 <sup>abcd</sup>	99.09±14.71 <sup>bed</sup>	99.09±24.46 <sup>bed</sup>
T16	31.46±2.59 <sup>bcde</sup>	89.81±18.80 <sup>cd</sup>	91.03±14.55 <sup>cd</sup>

注:同列中不同的小写字母表示不同处理间有显著性差异( $P < 0.05$ )。下同。

### 2.2 不同基质对‘丹红紫叶’紫薇容器苗叶绿素相对含量的影响

由图1可知,不同基质对‘丹红紫叶’紫薇容器苗叶片的叶绿素相对含量影响显著( $P < 0.05$ )。T13 处理的叶绿素相对含量最高,为 73.60,比 CK 显著增高 11.68% ( $P < 0.05$ );其次是 T12、T4、T9、T11 处理,分别比 CK 显著增高 10.62%、10.32%、9.11%、8.88% ( $P < 0.05$ )。T8 处理的叶绿素相对含量最低,为 65.40,与 CK 差异无显著性( $P > 0.05$ )。这说明 T13、T12、T4、T9、T11 基质配比有利于叶片叶绿素的合成与积累。

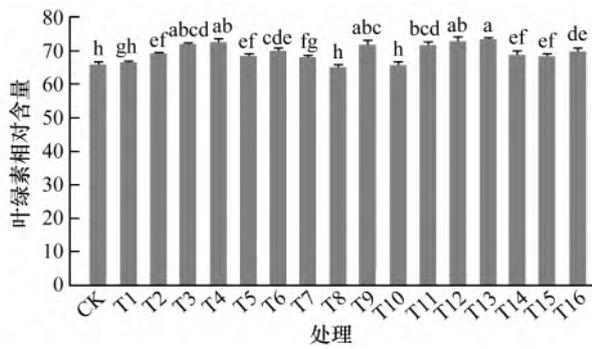


图 1 不同基质对‘丹红紫叶’紫薇容器苗叶绿素相对含量的影响

Figure 1 Effects of different substrates on relative chlorophyll content of *Lagerstroemia indica* ‘Ebony Embers’ container seedlings

注:不同小写字母表示不同处理间有显著性差异 ( $P < 0.05$ ),误差棒为标准误差。

### 2.3 不同基质对‘丹红紫叶’紫薇容器苗光合特性的影响

由表 4 可知,不同基质处理的‘丹红紫叶’紫薇容器苗的光合特性指标有显著差异 ( $P < 0.05$ )。T11 处理的净光合速率最大,其次是 T12 处理,彼此差异不显著 ( $P > 0.05$ ),但分别比 CK 显著提高了 413.58%、403.08% ( $P < 0.05$ );CK 的净光合速率最小,各处理

的净光合速率均大于 CK。T13 处理的蒸腾速率最大,比 CK 显著提高 145.20%;其次是 T1、T14、T11 处理,彼此无显著差异 ( $P > 0.05$ ),分别比 CK 显著增大 140.80%、115.60%、115.20% ( $P < 0.05$ );T4 处理的蒸腾速率最小,其次是 CK,二者无显著性差异 ( $P > 0.05$ )。T9 处理的气孔导度最高,比 CK 显著升高 144.44%;其次是 T13、T1、T12 处理,彼此间无显著差异 ( $P > 0.05$ ),分别比 CK 显著升高 133.33%、122.22%、111.11% ( $P < 0.05$ );T4 处理的气孔导度最低,其次是 CK,二者差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

由表 4 可知,T11 处理的胞间  $CO_2$  浓度最低,比 CK 显著降低 22.65% ( $P < 0.05$ );CK 的胞间  $CO_2$  浓度最高,其次是 T10 处理,两者无显著差异 ( $P > 0.05$ )。T4 处理的水分利用效率最高,其次 T11、T12 处理,三者无显著性差异 ( $P > 0.05$ ),分别比 CK 显著提高 140.00%、138.46% 和 135.79% ( $P < 0.05$ );T10 处理的水分利用效率最低,其次是 CK,二者也无显著性差异 ( $P > 0.05$ )。

整体而言,T11 处理的‘丹红紫叶’紫薇容器苗光合特性指标表现最好,光合作用能力最强,能够有效地利用光能将二氧化碳转化为有机物质,促进植株生长,其次是 T12、T13、T9 处理;CK 的容器苗光合能力较弱。

表 4 不同基质对‘丹红紫叶’紫薇容器苗光合指标的影响

Table 4 Effects of different substrates on photosynthetic indexes of *Lagerstroemia indica* ‘Ebony Embers’ container seedlings

处理	净光合速率/ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	气孔导度/ ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	胞间 $CO_2$ 浓度/ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-1}$ )	蒸腾速率/ ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	水分利用效率
CK	1.62±0.45 <sup>f</sup>	0.09±0.01 <sup>fg</sup>	372.22±7.98 <sup>a</sup>	2.50±0.36 <sup>c</sup>	0.65±0.22 <sup>gh</sup>
T1	5.60±1.25 <sup>bcd</sup>	0.20±0.04 <sup>abc</sup>	311.04±18.19 <sup>bcd</sup>	6.02±0.83 <sup>a</sup>	0.93±0.27 <sup>efg</sup>
T2	5.88±3.33 <sup>abcd</sup>	0.14±0.09 <sup>bcd</sup>	306.00±23.27 <sup>bcd</sup>	4.47±2.19 <sup>abcd</sup>	1.32±0.31 <sup>abcde</sup>
T3	4.77±1.91 <sup>cd</sup>	0.13±0.04 <sup>cdef</sup>	317.11±21.31 <sup>bde</sup>	5.35±1.42 <sup>ab</sup>	0.89±0.29 <sup>fgh</sup>
T4	3.72±2.80 <sup>def</sup>	0.07±0.04 <sup>g</sup>	320.61±13.19 <sup>bcd</sup>	2.39±0.97 <sup>e</sup>	1.56±0.45 <sup>a</sup>
T5	4.35±1.53 <sup>cd</sup>	0.12±0.02 <sup>defg</sup>	308.31±28.42 <sup>bcd</sup>	3.35±0.40 <sup>de</sup>	1.30±0.52 <sup>abcde</sup>
T6	4.29±2.26 <sup>cde</sup>	0.10±0.07 <sup>efg</sup>	295.20±27.59 <sup>fg</sup>	3.83±2.32 <sup>bde</sup>	1.12±0.29 <sup>abcde</sup>
T7	4.74±1.71 <sup>cd</sup>	0.12±0.03 <sup>defg</sup>	295.85±12.75 <sup>efg</sup>	4.05±0.92 <sup>bde</sup>	1.17±0.25 <sup>cdef</sup>
T8	4.09±3.07 <sup>cde</sup>	0.16±0.13 <sup>abcde</sup>	322.96±14.61 <sup>bc</sup>	4.28±2.55 <sup>bcd</sup>	0.96±0.29 <sup>fgh</sup>
T9	6.28±1.71 <sup>abc</sup>	0.22±0.06 <sup>a</sup>	326.67±5.63 <sup>b</sup>	5.29±1.01 <sup>abc</sup>	1.19±0.15 <sup>bcd</sup>
T10	1.85±0.68 <sup>ef</sup>	0.11±0.03 <sup>defg</sup>	371.83±6.84 <sup>a</sup>	3.35±0.64 <sup>de</sup>	0.55±0.15 <sup>h</sup>

续表

处理	净光合速率/ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	气孔导度/ ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	胞间 $\text{CO}_2$ 浓度/ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-1}$ )	蒸腾速率/ ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	水分利用效率
T11	8.32±2.18 <sup>a</sup>	0.18±0.06 <sup>abcd</sup>	287.93±10.43 <sup>g</sup>	5.38±1.37 <sup>ab</sup>	1.55±0.19 <sup>a</sup>
T12	8.15±2.26 <sup>a</sup>	0.19±0.06 <sup>abcd</sup>	313.44±10.87 <sup>bcdef</sup>	5.33±1.09 <sup>abc</sup>	1.53±0.24 <sup>ab</sup>
T13	7.95±2.48 <sup>ab</sup>	0.21±0.11 <sup>ab</sup>	295.04±22.79 <sup>fg</sup>	6.13±2.14 <sup>a</sup>	1.30±0.32 <sup>abcd</sup>
T14	7.75±1.91 <sup>ab</sup>	0.17±0.08 <sup>abcde</sup>	299.44±20.99 <sup>defg</sup>	5.39±1.78 <sup>ab</sup>	1.44±0.25 <sup>abc</sup>
T15	5.30±0.90 <sup>cd</sup>	0.13±0.06 <sup>bcdefg</sup>	305.21±14.22 <sup>cdefg</sup>	3.62±1.06 <sup>cde</sup>	1.46±0.25 <sup>ab</sup>
T16	4.26±1.62 <sup>cde</sup>	0.12±0.03 <sup>defg</sup>	299.74±19.85 <sup>defg</sup>	4.08±0.78 <sup>bcd</sup>	1.04±0.29 <sup>def</sup>

## 2.4 开花指标与光合特性指标的相关性分析

不同基质处理的‘丹红紫叶’紫薇容器苗开花指标与光合特性指标的相关性分析结果见表5。‘丹红紫叶’紫薇容器苗的花期、花径与光合特性各指标均无显著性相关( $P>0.05$ ),花序长、花序宽与

净光合速率、水分利用效率之间呈显著性正相关( $P<0.05$ ),与胞间  $\text{CO}_2$  浓度呈显著性负相关( $P<0.05$ ),而与气孔导度、蒸腾速率、叶绿素相对含量之间无显著相关( $P>0.05$ ),这说明开花指标中只有花序与光合能力、水分利用效率及胞间  $\text{CO}_2$  浓度关系密切。

表5 开花指标与光合特性指标的相关系数

Table 5 Correlation coefficients between flowering indicators and photosynthetic characteristics

指标	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
X1	1.000	0.733**	0.511*	0.442	0.214	0.290	0.130	-0.418	0.113	0.351
X2	0.733**	1.000	0.161	0.105	-0.206	0.150	0.242	-0.257	0.154	0.149
X3	0.511*	0.161	1.000	0.863**	0.313	0.589*	0.309	-0.502*	0.242	0.648**
X4	0.442	0.105	0.863**	1.000	0.265	0.511*	0.157	-0.538*	0.174	0.652**
X5	0.214	-0.206	0.313	0.265	1.000	0.611**	0.280	-0.489*	0.364	0.628**
X6	0.290	0.150	0.589*	0.511*	0.611**	1.000	0.771**	-0.703*	0.800**	0.755**
X7	0.130	0.242	0.309	0.157	0.280	0.771**	1.000	-0.317	0.892**	0.267
X8	-0.418	-0.257	-0.502*	-0.538*	-0.489*	-0.703**	-0.317	1.000	-0.485*	-0.747**
X9	0.113	0.154	0.242	0.174	0.364	0.800**	0.892**	-0.485*	1.000	0.250
X10	0.351	0.149	0.648**	0.652**	0.628**	0.755**	0.267	-0.747**	0.250	1.000

\*\*：在0.01水平上极显著相关；\*：在0.05水平上显著相关。X1：花期；X2：花径；X3：花序长；X4：花序宽；X5：叶绿素相对含量；X6：净光合速率；X7：气孔导度；X8：胞间  $\text{CO}_2$  浓度；X9：蒸腾速率；X10：水分利用效率。

## 2.5 各项指标的主成分分析

为了筛选出‘丹红紫叶’紫薇容器苗培育的适宜基质,采用主成分分析方法对各项指标及各基质处理的综合表现进行了研究。由表6可知,前3个

主成分PC1、PC2、PC3的特征值大于1,累积方差贡献率为81.908%,这表明提取3个主成分就能代表原来10个指标信息的81.908%,根据3个主成分系数得到F1、F2、F3的线性组合:F1=0.066X1-0.134X2+0.254X3+0.292X4+0.197X5+0.087X6-0.147X7-

$0.171X_8 - 0.126X_9 + 0.279X_{10}$ ;  $F_2 = -0.081X_1 + 0.060X_2 - 0.106X_3 - 0.165X_4 + 0.059X_5 + 0.241X_6 + 0.416X_7 - 0.045X_8 + 0.419X_9 - 0.058X_{10}$ ;  $F_3 = 0.434X_1 + 0.565X_2 + 0.061X_3 + 0.026X_4 - 0.268X_5 - 0.061X_6 + 0.053X_7 - 0.024X_8 - 0.003X_9 - 0.080X_{10}$ 。

表 6 主成分分析方差解释  
Table 6 PCA variance explained

指标	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
PC1	4.886	48.859	48.859
PC2	1.792	17.919	66.778
PC3	1.513	15.130	81.908

在主成分 F1 中, X4(花序宽)、X10(水分利用效率)、X3(花序长)的系数大于其他指标的系数,在主成分 F1 起主导作用,说明主成分 F1 主要代表花

序与水分利用效率。在主成分 F2 中, X9(蒸腾速率)、X7(气孔导度)、X6(净光合速率)的系数大于其他指标的系数,在主成分 F2 起主导作用,说明主成分 F2 主要代表光合特性。在主成分 F3 中, X2(花径)、X1(花期)、X5(叶绿素相对含量)的系数大于其他指标的系数,在主成分 F3 起主导作用,说明主成分 F3 主要代表开花指标与叶绿素相对含量。

由表 7 可知,主成分分析的综合得分排序为  $T_{11} > T_{13} > T_5 > T_2 > T_{14} > T_{12} > T_6 > T_9 > T_{15} > T_7 > T_4 > T_1 > T_{16} > T_3 > T_8 > T_{10} > CK$ 。T11(圃地土 30%+泥炭 50%+蛭石 10%+珍珠岩 10%)综合表现最好,其次是 T13(圃地土 10%+泥炭 50%+蛭石 10%+珍珠岩 30%),CK(纯圃地土)表现最差。因此,圃地土 30%+泥炭 50%+蛭石 10%+珍珠岩 10%基质(T11)是‘丹红紫叶’紫薇 2 年生容器苗培育的最适宜基质。

表 7 主成分综合得分和排名  
Table 7 Principal component comprehensive score and ranking

处理	第一主成分得分(F1)	第二主成分得分(F2)	第三主成分得分(F3)	综合得分(F)	排序
CK	-0.876 3	-1.622 8	-1.760 4	-0.985 3	17
T1	-1.074 8	1.341 5	0.291 3	-0.240 7	12
T2	0.773 7	-0.307 2	0.511 6	0.400 4	4
T3	-0.870 3	0.604 5	-0.635 4	-0.413 0	14
T4	0.512 3	-1.444 8	-0.476 3	-0.080 7	11
T5	0.910 9	-1.157 2	1.568 9	0.475 1	3
T6	0.958 5	-0.954 3	-0.859 8	0.167 2	7
T7	-0.021 1	-0.383 6	0.593 4	0.010 7	10
T8	-1.427 7	0.261 0	1.257 7	-0.460 5	15
T9	-0.481 5	1.304 2	0.342 1	0.050 2	8
T10	-1.959 8	-0.815 0	0.804 7	-0.981 8	16
T11	1.772 8	0.405 1	1.484 2	1.163 3	1
T12	0.664 3	1.068 5	-1.710 3	0.257 2	6
T13	0.789 9	1.453 7	-0.800 7	0.525 3	2
T14	0.439 4	0.780 3	-0.022 4	0.351 1	5
T15	0.254 1	-0.365 3	-0.092 2	0.044 8	9
T16	-0.364 5	-0.168 4	-0.496 4	-0.283 4	13

注:综合得分计算公式为  $F = (F_1 \times 48.859 + F_2 \times 17.919 + F_3 \times 15.130) / 100$ 。

### 3 讨论

育苗基质是影响容器苗生长发育至关重要的因素<sup>[16]</sup>,不同基质对容器苗生长、开花和生理均有显著影响<sup>[17-23]</sup>,优质容器苗培育的关键是选择适宜育苗基质。花径、花序、花期等性状是评价紫薇开花品质和观赏性的重要依据。本研究表明,不同基质对‘丹红紫叶’紫薇开花指标有不同的影响,T11处理在初花期、盛花期和末花期方面表现较佳,花期最长,比CK延长23.66 d,进入末花期时间最迟,比CK迟17 d,CK的花期最短。袁必局等<sup>[22]</sup>研究认为适宜的栽培基质能延长迷你蝴蝶兰(*Miniature Phalaenopsis*)的花期,提早开花,这与本研究结果一致。T11处理的花序长和宽最大,分别比CK显著增大26.40%、30.20%,花径比CK显著大22.63%,CK的花径最小。桂敏等<sup>[24]</sup>研究认为长寿花(*Kalanchoe blossfeldiana*)盆栽最佳基质的花径均大于其他基质处理,这与本研究结果吻合。

叶绿素相对含量反映了植物光合作用的效率和其潜在能力<sup>[18]</sup>。本研究表明,不同基质对‘丹红紫叶’紫薇容器苗叶片的叶绿素相对含量影响显著,T13、T12处理的叶绿素相对含量较高,分别比CK显著高11.68%、10.62%,CK的叶绿素相对含量较低。这与尤毅等<sup>[25]</sup>对杂交兰‘春蕙’(*Cymbidium hybridumfaberi* ‘chuihui’)、卢万义等<sup>[26]</sup>对沃柑(‘Orah’)的研究结果基本吻合,植株在最适宜的栽培基质中的叶片叶绿素含量较高。

光合作用反映了植物有机物合成与光能利用能力,常用净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间CO<sub>2</sub>浓度、水分利用效率等光合特性指标来表示光合作用状况。在本研究中,不同基质对‘丹红紫叶’紫薇容器苗的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间CO<sub>2</sub>浓度、水分利用效率等光合特性指标影响显著。T11处理的容器苗光合特性指标综合表现最好,光合作用能力最强,其次是T12、T13、T9处理,CK表现较差,容器苗光合能力较弱。詹孝慈等<sup>[21]</sup>研究认为不同栽培基质对油茶容器苗的净光合速率、气孔导度、胞间CO<sub>2</sub>浓度、蒸腾速率有较大影响,油茶苗在最适宜的栽培基质中的光合特性综合指标均最大,这与本研究结果基本一致,说明在适宜的育苗基质中容器苗的光合生理状态综合表现最佳。

有研究表明,植物开花指标与光合特性指标有一定关联<sup>[27-28]</sup>。在本研究中,‘丹红紫叶’紫薇容器苗的花期、花径与光合特性各指标均无显著相关,仅花序长、花序宽与净光合速率、水分利用效率之间呈显著性正相关,与胞间CO<sub>2</sub>浓度呈显著性负相关,这可能与不同植物的遗传特性不同有关。

主成分分析法综合评价了不同基质对‘丹红紫叶’紫薇容器苗开花和光合特性的影响。本研究中,主成分分析综合得分最高的是T11处理,CK最低,表明T11(圃地土30%+泥炭50%+蛭石10%+珍珠岩10%)基质是‘丹红紫叶’紫薇2年生容器苗培育的最适宜基质,而CK(纯圃地土)则不宜作为紫薇容器苗培育的基质,这与本项目组关于不同基质对紫叶紫薇容器苗生长及生理影响的研究结果<sup>[15]</sup>相吻合,说明圃地土与泥炭、蛭石、珍珠岩适量混合配制的基质,提高了基质的透气性、保水性和有机质含量,有利于紫薇容器苗生长与开花。

### 4 结论

不同基质处理对‘丹红紫叶’紫薇容器苗开花和光合特性的影响显著。花序与光合能力、水分利用效率及胞间CO<sub>2</sub>浓度关系密切。T11处理的开花指标和光合特性指标综合表现最好,花期最长,花序长和宽、净光合速率、水分利用效率最大,花径、叶绿素相对含量、气孔导度较大,胞间CO<sub>2</sub>浓度最低,圃地土30%+泥炭50%+蛭石10%+珍珠岩10%基质(T11)是‘丹红紫叶’紫薇2年生容器苗培育的最适宜基质,研究结果可为紫薇优质容器苗培育提供理论指导。

#### 参考文献:

- [1] 王晓明,陈明皋,潘会堂,等.紫薇新品种创制与栽培技术研究[M].北京:中国林业出版社,2022:3-20.
- [2] 乔中全,王晓明,曾慧杰,等.不育紫薇‘湘韵’扦插过程中内源激素含量变化[J].湖南林业科技,2015,42(1):49-53.
- [3] 王栋,曹晓娟.不同基质和激素及浓度对美国紫薇嫩枝微型扦插育苗的影响[J].陕西林业科技,2021,49(3):52-55.
- [4] 李茂娟,崔强,徐毓泽,等.紫叶紫薇高接换冠技术研究[J].中国农学通报,2023,39(25):21-26.
- [5] 张晨.紫薇高枝嫁接繁殖技术研究[D].北京:北京林业大学,2017.

- [6] 张晴,王湘莹,陈亮明,等. ‘紫琦’紫薇组织培养及增殖过程中内源激素含量变化[J]. 中南林业科技大学学报,2023,43(7):101-108.
- [7] 饶丹丹,王湘莹,蔡能,等. 紫叶紫薇良种组培快繁研究[J]. 中南林业科技大学学报,2020,40(12):75-82.
- [8] 王肖雄,祝俊健,季晶晶等. 不同基质、容器规格和施肥对紫薇容器苗质量的影响研究[J]. 绿色科技,2016(13):123-125.
- [9] 王金凤,陈卓梅,柳新红. 紫薇容器育苗基质配方筛选研究[J]. 浙江林业科技,2014,34(1):12-16.
- [10] MENG G L, LUAN D T, TAI Z J, et al. Effects of different substrate ratios on the growth and physiology of *Sequoia sempervirens* container seedlings [J]. Compost Science & Utilization, 2019, 27(3):169-17
- [11] 曹媛媛,杨晓玥,吴文等. 不同容器和基质配比对榉树容器苗营养积累的影响[J]. 中南林业科技大学学报,2020,40(4):14-21
- [12] 李晓菁,龙宇文,史锋厚,等. 基质配比对南京椴容器苗生长及光合特性的影响[J]. 西南林业大学学报(自然科学),2023,43(5):15-22.
- [13] 谭飞,周光良,胡红玲,等. 不同基质配比对桢楠幼苗生长及其光合特性的影响[J]. 应用与环境生物学报,2016,22(5):823-830.
- [14] 王一菲,李泽根,邓伟,等. 不同基质配比对杜梨容器苗生长及光合参数的影响[J]. 林业与生态科学,2023,38(4):500-506.
- [15] 魏溧姣,王晓明,王湘莹,等. 不同基质对紫叶紫薇容器苗生长及生理特性的影响[J]. 中南林业科技大学学报,2023,43(4):10-19.
- [16] NEGI R, KASHYAP B, DHIMAN S R, et al. Standardization of growing medium for growth and flowering of *Astroemeria* cv. ‘capri’ under solan-nauni conditions [J]. International Journal of Bio-resource and Stress Management, 2022, 13(11):1296-1301.
- [17] 杨玲,梁春飞,谷战英,等. 基质比对山苍子容器苗生长的影响[J]. 中南林业科技大学学报,2020,40(10):94-100.
- [18] 李媛媛. 人工栽培基质对杜鹃生长发育的影响[D]. 合肥:安徽农业大学,2018.
- [20] 张瑞博,王庆,刘国宇,等. 容器规格、基质比对菩提树容器苗生长及生理的影响[J]. 经济林研究,2021,39(3):243-250.
- [21] 詹孝慈,罗在柒,武忠亮,等. 不同栽培基质对油茶容器苗生长和光合特性的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(21):123-127.
- [22] 袁必局,李香,张叶,等. 不同基质材料对迷你型蝴蝶兰生长及开花性状的影响[J]. 分子植物育种,2023,21(20):6933-6938.
- [23] 匡敏,王定卿,赵佳文,等. 不同基质配方对楠木容器苗生长的影响[J]. 湖南生态科学学报,2022,9(2):76-82.
- [24] 桂敏,周永熊,李进昆,等. 不同基质对比对长寿花生长和开花的影响[J]. 安徽农业科学,2020,48(21):35-38.
- [25] 尤毅,德庆措姆,刘羽,等. 不同基质对西藏林芝地区杂交兰‘春蕙’品种光合和生理指标的影响[J]. 热带作物学报 2014,35(7):1302-1305.
- [26] 卢万义,覃创羿,鲁宗翰,等. 不同基质对比对沃柑大苗生长、生理及光合特性的影响[J]. 中国果树,2023(3):79-84.
- [27] 邹晶. 三个品种大花蕙兰开花期光合生理特性研究[D]. 贵阳:贵州师范大学,2009.
- [28] 赵艳莉,王司琦,李美婷,等. 地被菊开花过程中叶片光合荧光特性变化分析[J]. 河南科学,2022,40(11):1819-1826.

责任编辑:朱敏杰  
英文校对:王芬

# 西南喀斯特和非喀斯特地区典型植物叶片养分特征

刘清扬, 王忠诚\*

(中南林业科技大学 林学院, 湖南长沙 410004)

**摘要:**【目的】喀斯特地区与非喀斯特地区森林之间环境条件差别大,通过比较研究两个地区典型植物叶片的养分特征,探究植物是如何改变元素之间的平衡性来适应不同环境。【方法】在广西和贵州沿纬度梯度选取7组喀斯特与非喀斯特的配对样地,采集优势物种植物叶片,测定其N、P、K、Ca、Mg元素含量,分析西南喀斯特与非喀斯特地区典型植物叶片养分特征、化学计量特征、元素之间相互关系以及随纬度的变化特征。【结果】(1)喀斯特地区植物叶片Ca、Mg含量(2.19 g/kg、0.33 g/kg)显著高于非喀斯特地区(0.92 g/kg、0.20 g/kg),K含量(6.53 g/kg)显著低于非喀斯特地区(10.03 g/kg)( $P < 0.05$ ),N、P元素含量并无显著性差异。(2)在喀斯特地区和非喀斯特森林中,N与P、K、Mg之间均呈显著正相关关系( $P < 0.05$ ),非喀斯特地区中P与K、Mg元素呈显著正相关关系( $P < 0.05$ ),P与K元素之间的相关关系在不同岩性下有着显著的不同。(3)在喀斯特地区,N、P元素与纬度显著正相关,在非喀斯特地区,N、P、Ca、Mg与纬度有着显著相关性( $P < 0.05$ );P元素对纬度变化的响应都是最敏感的;喀斯特地区与非喀斯特地区的植物叶片N/P、N/K、K/P比与纬度均显著相关( $P < 0.05$ )。【结论】喀斯特与非喀斯特植物均为低钙型植物,P元素对纬度变化的响应最敏感,喀斯特地区和非喀斯特地区植物的N与P、K、Mg吸收,K与Mg吸收成一定的比例。在西南地区,随着纬度的升高,喀斯特与非喀斯特植物在生长过程中都受到了N元素的限制,不受K元素的限制。

**关键词:** 喀斯特; 典型植物叶片; 叶片化学计量特征; 纬度

中图分类号: Q948

文献标志码: A

文章编号: 2095-7300(2024)02-0010-08

## Nutrient Characteristics of Typical Plant Leaves in Karst and Non-karst Regions of Southwest China

LIU Qingyang, WANG Zhongcheng\*

(College of Forestry, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

**Abstract:**【Objective】Environmental conditions vary greatly between karst and non-karst forests. By comparing the nutrient characteristics of typical plant leaves in the two regions, we explored how plants change the balance between elements to adapt to different environments.【Method】Seven groups of paired

收稿日期: 2024-03-03

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFF1300703)

作者简介: \*为通信作者,王忠诚,博士,教授,研究方向:水土保持与荒漠化防治,E-mail:wzc366@163.com;刘清扬,硕士,研究方向:资源利用与植物保护,E-mail:1303212204@qq.com。

引文格式: 刘清扬,王忠诚.西南喀斯特和非喀斯特地区典型植物叶片养分特征[J].湖南生态科学学报,2024,11(2):10-17. LIU Q Y, WANG Z C. Nutrient characteristics of typical plant leaves in karst and non-karst regions of southwest China[J]. Journal of Hunan Ecological Science, 2024,11(2):10-17.

plots of karst and non-karst were selected along the latitudinal gradient in Guangxi and Guizhou, and the leaves of dominant species were collected, and their contents of N, P, K, Ca, and Mg elements were determined, and the nutrient characteristics, stoichiometric characteristics, interrelationships between elements and the variation characteristics of typical plants in karst and non-karst regions of southwest China were analyzed. 【Result】The results showed that: (1) The contents of Ca and Mg in leaves in karst areas (2.19 g/kg and 0.33 g/kg) were significantly higher than those in non-karst areas (0.92 g/kg and 0.20 g/kg), and the contents of K (6.53 g/kg) in karst areas were significantly lower than those in non-karst areas (10.03 g/kg), and there was no significant difference in the contents of N and P. (2) There was a significant positive correlation between N and P, K and Mg in karst and non-karst areas, and P was significantly positively correlated with K and Mg in non-karst areas, and the correlation between P and K was significantly different under different lithologies. (3) In karst areas, N and P were significantly positively correlated with latitude, and in non-karst areas, N, P, Ca and Mg were significantly correlated with latitude. P was the most sensitive to latitudinal changes; the NP ratio, NK ratio and KP ratio of plant leaves in karst and non-karst areas were significantly correlated with latitude. 【Conclusion】Both karst and non-karst plants are low-calcium plants, and P is the most sensitive to latitudinal changes. The absorption of N and P, K, Mg in plants in karst and non-karst areas is in a certain proportion, and so is the absorption of K and Mg. In southwest China, with the increase of latitude, both karst and non-karst plants are limited by N but not by K during their growth.

**Keywords:** karst; typical plant leaves; stoichiometric characteristics of leaves; latitude

生态化学计量学是一门研究有机体化学元素组成以及生态系统能量平衡的科学<sup>[1]</sup>。植物生态化学计量学是由生态化学计量学发展而来的,植物生态化学计量学主要研究的是植物器官元素含量的计量特征,以及其与环境因子、生态系统功能之间的耦合关系<sup>[2]</sup>。氮(N)、磷(P)、钾(K)、钙(Ca)、镁(Mg)元素是组成植物有机体、辅酶和参与渗透调节作用的大量元素,在植物的生长发育以及在植物各种的生理机制的调节方面起到重要作用<sup>[3]</sup>,叶片是植物体代谢最活跃的器官,对环境变化十分敏感且可塑性大,叶片营养元素组成及结构不仅能够反映植物的生态策略,也是植物适应生境条件的一种表征<sup>[4]</sup>。当前,大量的国内外学者对植物叶片生态化学计量特征进行过大量研究,尤其在限制性养分元素判别方面形成了植物 N/P 养分限制理论。叶片 N/P 可以反映植物生长受 N 或 P 的限制情况<sup>[5-7]</sup>,也是决定群落结构和功能的关键性指标,可作为判断限制植物群落生产力的依据,而且叶片 N 含量以 P 含量的  $3/4$ <sup>[8-10]</sup>、 $2/3$ <sup>[11]</sup> 或  $0.73$ <sup>[12]</sup> 指数增长。近年来,国内外对植物叶片的生态化学计量的研究取得了丰富的成果,从不同地理尺度、不同生态系统、不同生活型等方面开展了大量研究<sup>[13]</sup>,但是大部分集中于对植物叶片养分 C、N、P 元素的研

究,对 K、Ca、Mg 元素的研究较少,而 K、Ca、Mg 对植物维持生长发育以及进行光合作用是不可或缺的<sup>[13-14]</sup>。

西南喀斯特地区是我国生态环境最脆弱的地区之一,喀斯特作为一种特殊的地貌类型,土壤生境中富含钙、镁,是岩溶发育最强烈、生态系统极为脆弱的典型地区<sup>[15]</sup>,喀斯特地区基岩裸露,富钙、缺土、缺有效水、土被不连续且浅薄,生境极其特殊<sup>[16]</sup>。喀斯特石漠化环境生态化学计量学的研究引起了广大学者的关注<sup>[16-17]</sup>,关于西南喀斯特石漠化地区 N、P、K、Ca、Mg 化学计量学的相关研究大部分集中于小生境尺度,但是很少从纬度梯度上直接对比植物在喀斯特地区与非喀斯特地区上生态化学计量上的异同<sup>[13,18]</sup>。对比分析纬度梯度下喀斯特植物和非喀斯特森林植物叶片元素的差异有利于揭示植物对喀斯特生境的生理生态适应,可为其生物多样性保护和石漠化修复提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于中国西南的贵州和广西两省 ( $22^{\circ}42' - 27^{\circ}53' N$ ,  $104^{\circ}82' - 108^{\circ}37' E$ ), 海拔

146~2 890 m(自南向北),属于典型的亚热带湿润季风气候,年平均气温为12.1~21.1℃,年平均降水量为1 022~1 670 mm。喀斯特地区的岩性为石灰岩、白云岩及其混合物,非喀斯特地区岩性以碎

屑岩为主(图1)。研究区植被种类较多,主要有亚热带常绿阔叶林、亚热带针叶林及其混交林、温带阔叶/针叶林及其混交林,以及亚热带灌丛、亚热带草丛、草甸。

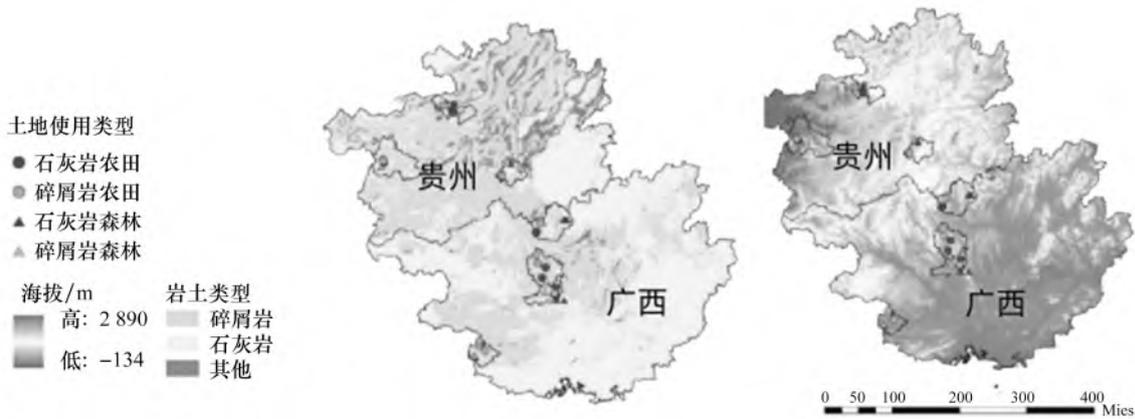


图1 研究区概况

Figure 1 Overview of the study area

## 1.2 样品采集及测定

在全面调查的基础上,根据典型性和代表性的原则,在都安、都匀、金沙、水城、环江、龙州、马山7个县(市、区)采集植物叶片样本。在每个县(市、区)的喀斯特和非喀斯特森林配对样地分别建立了3个20 m×30 m样地(共6×7=42个样地),在植被调查的基础上选取每个研究区的优势物种(物种数量排名前五),于2018年8—10月植物生长旺盛期间选取植株个体冠层顶端向阳健康生长的叶片采集植物样本,每个物种采集3个重复,采集植株个体100片左右。本研究共调查了354个植株个体(群落的典型优势种),隶属于31科43属50种,以壳斗科、樟科与芸香科的物种为主。其中,落叶树种为19种,常绿树种为31种,共有种14个。将采集的叶片用蒸馏水洗净后用滤纸擦干,先放入烘箱105℃杀青0.5 h,而后65℃烘干至恒重后,用球磨机磨碎后过2 mm的筛,用于叶片养分含量的测定。

叶片全氮、全磷于 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮后使用AA3流动注射仪测定,全钾于 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮后使用火焰光度计测定,全钙和全镁采用四酸法消解,消解完成后植物样品用原子吸收分光光度计进行测定,所有样品和指标均进行3次重复测定。

## 1.3 数据处理与分析

所有数据在分析和处理过程中,均进行正态分布检验和方差同质性检验,若不符合正态分布,则采用对数转换以满足统计分析要求。采用单因素方差分析(One-Way ANOVA),分析喀斯特和非喀斯特植物叶片各元素含量的差异(显著水平分别为 $\alpha=0.05$ 和 $\alpha=0.01$ )。采样相关分析分析植物叶片元素含量与气候因子的关系。数据统计分析和绘图分别通过IBM SPSS Statistics 19.0和OriginPro 2015完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 喀斯特与非喀斯特森林优势植物叶片养分及化学计量特征

喀斯特地区Ca、Mg元素含量显著高于非喀斯特地区,K元素含量显著低于非喀斯特地区,N、P元素含量无显著差异。如图2所示,喀斯特地区植物叶片Ca、Mg平均含量分别为2.19 g/kg、0.33 g/kg,显著高于非喀斯特地区(0.92 g/kg、0.20 g/kg)( $P<0.05$ )。喀斯特地区叶片N的含量为6.02~22.58 g/kg,P的含量为0.43~14.32 g/kg,均高于非喀斯特地区

(5.49 ~ 19.34 g/kg, 0.49 ~ 14.16 g/kg), 但没有显著性差异。喀斯特和非喀斯特地区均为 K 元素变化幅度最大, 变化幅度分别为 31.32 g/kg、

47.10 g/kg, 且喀斯特地区 K 元素含量显著低于非喀斯特地区, 平均低 3.5 g/kg。在喀斯特地区中, N/P 为 8.8, 而在非喀斯特地区, 该值为 8.6。

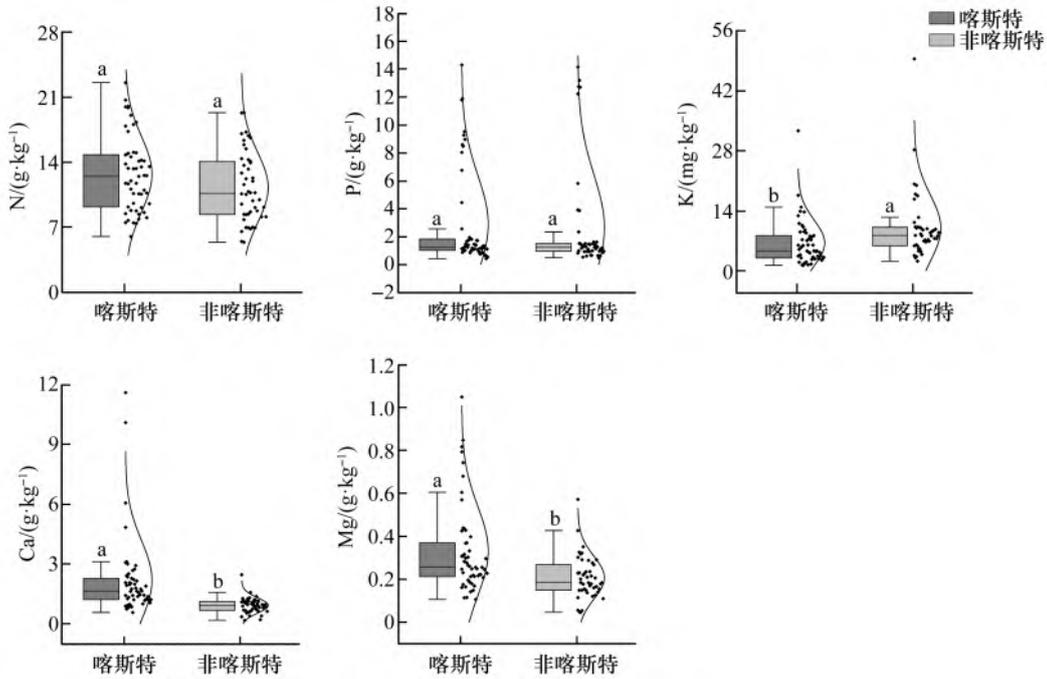


图 2 喀斯特与非喀斯特植物叶片 N、P、K、Ca、Mg 含量  
Figure 2 N, P, K, Ca and Mg contents in leaves of karst and Non-karst plants

### 2.2 喀斯特与非喀斯特森林内植物叶片养分相关性分析

如图 3 所示, 在喀斯特地区, N 与 P、K、Ca、Mg 元素之间存在正相关关系, P 与 K 之间存在正相关关系, K 与 Ca、Mg 之间存在正相关关系, Ca 与 Mg 之间存在正相关关系, 其中 N 与 P、K 与 Mg 之间正相关关系显著 ( $P < 0.05$ ), P 与 K、Mg 之间正相关关系显著 ( $P < 0.05$ ), K 与 Mg 之间正相关关系显著 ( $P < 0.05$ ); 在非喀斯特地区, K 与 Ca 之间呈负相关关系, P 与 Ca 之间并无相关关系, 其余元素均呈现正相关关系, N 与 P、K、Mg, P 与 K、Mg, K 与 Mg 之间均呈现显著正相关关系 ( $P < 0.05$ ); 在喀斯特地区和非喀斯特地区, N 与 P、Mg 之间均呈显著正相关关系 ( $P < 0.05$ ), 而与之相反的是 P 元素与 K 元素之间的相关关系在不同岩性下有着显著的不同。

### 2.3 喀斯特和非喀斯特森林典型植物叶片元素随纬度的变异规律

喀斯特与非喀斯特森林植物叶片养分含量随纬度的相关性如图 4 所示。喀斯特森林植物叶片 N、P 元素含量与纬度呈显著的线性负相关关系, 随着纬度的增加, 植物叶片 N、P 元素含量逐渐减少。但 K、Ca、Mg 元素含量与纬度之间并没有相关性, 说明喀斯特地区植物叶片 K、Ca、Mg 元素对纬度的敏感性不高。在非喀斯特地区, N、Ca、Mg 元素与纬度呈显著的相关关系, 总体上呈现“抛物线”规律, 随着纬度的增加, 植物叶片 N、Ca、Mg 元素先减少后增加, 在 25.20°N 处植物 N、Ca、Mg 元素含量最低, 而 P 元素与纬度之间呈显著的负线性相关关系, K 元素与纬度之间没有显著相关关系。

喀斯特地区与非喀斯特地区的植物叶片 N/K、K/P 和 N/P, 都与纬度显著相关 (图 5)。在喀斯特地区, 随着纬度的升高, N/K 和 N/P 都显著增加, 呈显著的正线性相关关系, N/P 比呈现先增大后减小

的趋势。在非喀斯特地区, N/K、K/P 和 N/P, 都与 纬度呈现显著正相关关系。

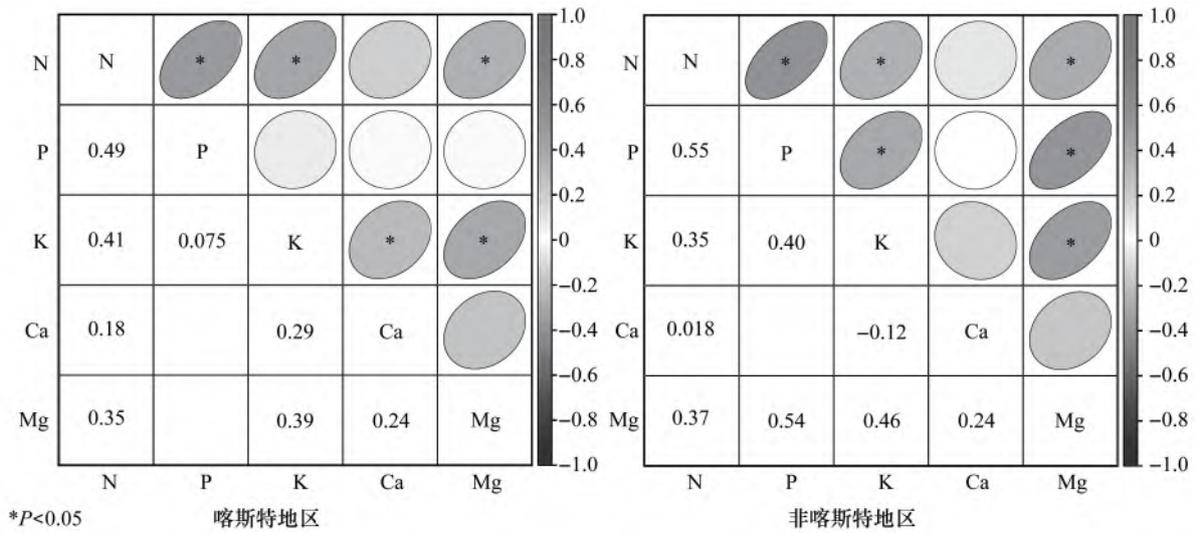


图3 喀斯特与非喀斯特植物叶片 N、P、K、Ca、Mg 之间的相关性  
Figure 3 Correlation between N, P, K, Ca, Mg in leaves of karst and non-karst plants  
注: \* 在 0.05 水平上显著相关, 下同。

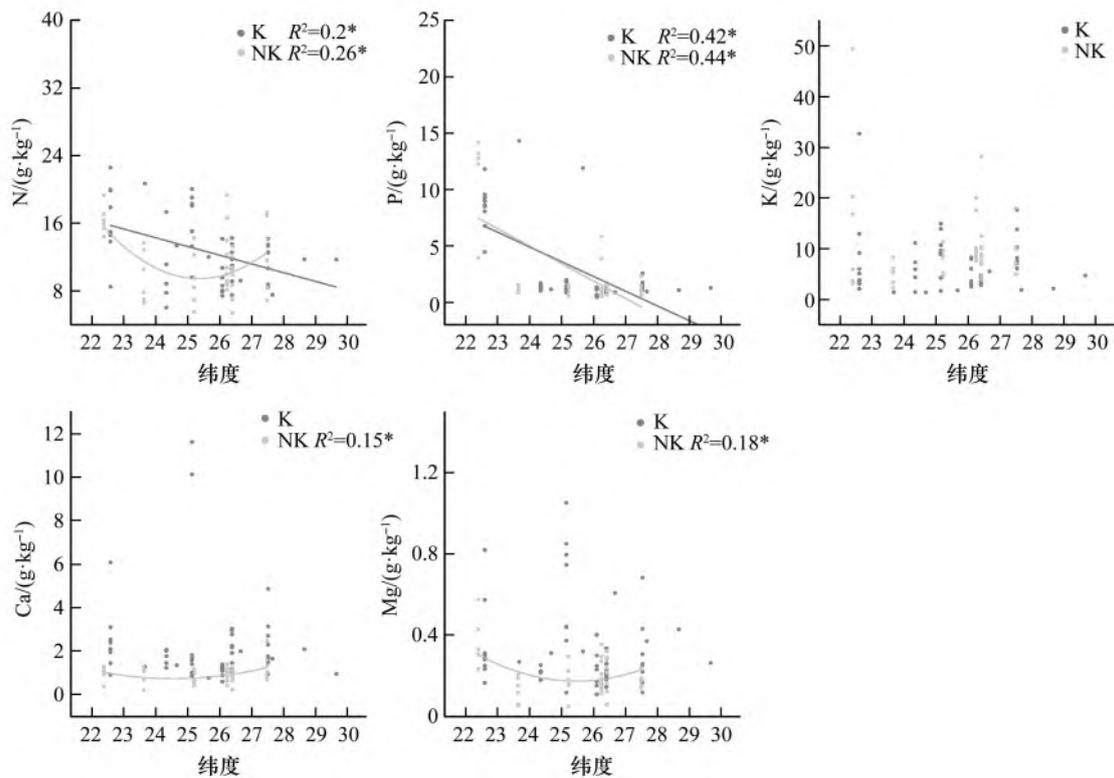


图4 喀斯特与非喀斯特植物叶片 N、P、K、Ca、Mg 与纬度的拟合图  
Figure 4 Fitting diagram of N, P, K, Ca, Mg and latitude of leaves of karst and non-karst plants

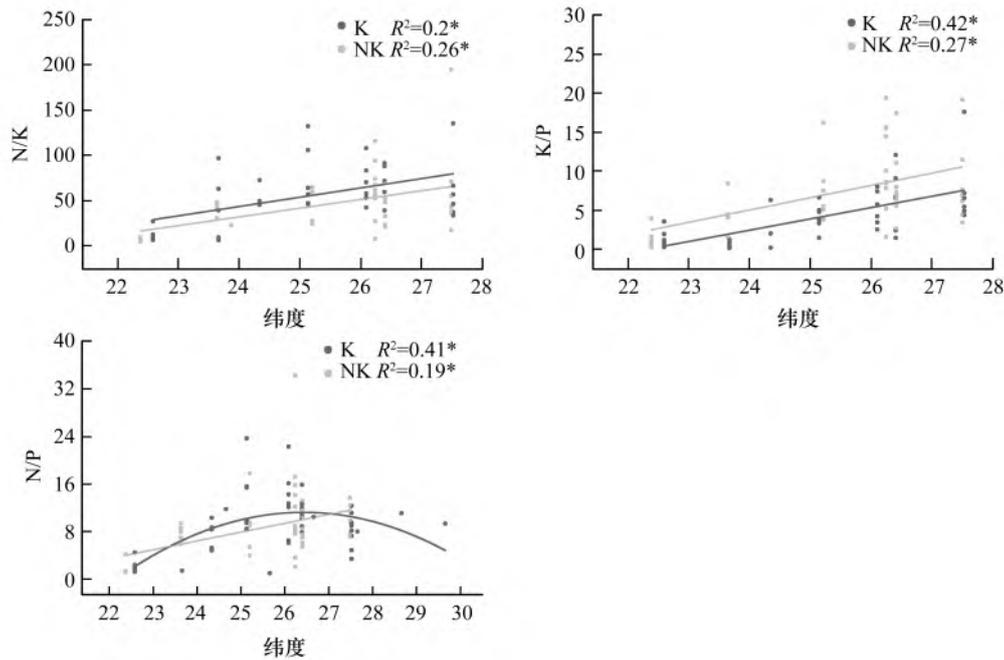


图 5 喀斯特与非喀斯特植物叶片 N/K、K/P、N/P 随纬度的拟合图

Figure 5 Fitting plot of leaf N/K K/P N/P ratio of karst versus non-karst plants with latitude

### 3 讨 论

#### 3.1 喀斯特与非喀斯特地区植物叶片 N、P、K、Ca、Mg 化学计量特征

喀斯特植物叶片 N 的含量 (12.72 g/kg) 与其他关于喀斯特植物叶片研究结果一致<sup>[19]</sup>, 喀斯特植物叶片 N 的含量 (12.72 g/kg) 与非喀斯特植物叶片 N 的含量 (11.29 g/kg) 都略低于我国陆地植物叶片平均值 (18.6 g/kg) 以及世界范围的平均值 (20.9 g/kg)<sup>[12]</sup>; 喀斯特植物叶片 P 的含量 (2.89 g/kg) 与非喀斯特植物叶片 P 的含量 (2.65 g/kg) 高于全球水平 (1.77 g/kg); 喀斯特与非喀斯特植物叶片 N/P 明显低于全国的平均水平 15.2; 喀斯特植物叶片 K 的含量 (6.53 g/kg) 与非喀斯特植物叶片 K 的含量 (10.03 g/kg) 低于全国范围 (12.57 g/kg); 喀斯特植物叶片 Ca 元素含量 (2.18 g/kg) 高于全国范围 (1.55 g/kg), 非喀斯特植物的叶片 Ca 元素含量 (0.92 g/kg) 小于全国范围; 喀斯特植物叶片 Mg 的含量 (0.33 g/kg) 与非喀斯特植物的叶片 Mg 的含量 (0.21 g/kg) 远低于全国范围 (2.87 g/kg)。

N、P 元素的化学计量比是一种关键性指标用来决定群落结构和功能, 可以作为植物生产活动过

程中起限制性作用的营养元素。大量研究发现, N 和 P 计量特征在不同个体、物种、生活型、生境以及温度区等分类上存在较大的差异, 个体间叶片 N 元素含量可相差 30 倍, P 元素含量可以相差 100 倍以上<sup>[19]</sup>, 这可能是本研究植物叶片 P 含量远高于全球水平的原因。N/P 是判断植物营养元素限制、植物的生长速率以及群落结构组成等的重要指标, 有关 N/P 作为陆生生态系统的营养元素的一种限制性阈值, 在实验室和野外观测到的值差异很大, 很难有统一的 N/P 观测值作为阈值来衡量或评判某个个体、群落或者生态系统的类型的所有的情况。Güsewell<sup>[5]</sup>在结合了大量的研究结果后得出: N/P 小于 10 时, 植物受 N 元素限制, 增加 N 肥可以增加植被的生物量, N/P 大于 20 时, 植物受 P 元素限制, 增加 P 肥可以增加植被的生物量, 在两者之间时, 施肥对植被生物量的效果与 N/P 关系不明显。在本研究中, 在喀斯特地区中, N/P 为 8.8, 在非喀斯特地区, N/P 的值为 8.6, 均低于 Güsewell 的 10:1 的全球范围, 可以看出在西南地区, 不论是喀斯特地区还是非喀斯特地区植物在生长过程中都更多地受到了 N 的限制。Venterink 等<sup>[20]</sup>的研究对植物 K 元素限制阈值设定了标准: 当  $N/K > 2.1$ ,  $K/P < 3.4$  时, 植物的生长发育受到 K 元素的限制。在本

研究中,喀斯特地区中植物叶片 N/K 为 3.06,大于 2.1, K/P 为 4.45,大于 3.4,非喀斯特地区植物叶片的 N/K 为 1.53,小于 2.1, K/P 为 7.3,大于 3.4,可以看出喀斯特地区与非喀斯特地区中的植物的生长发育都不受 K 元素的限制。

本研究中,喀斯特地区植物叶片 Ca、Mg 元素显著高于非喀斯特地区植物。可能是因为在喀斯特地区的地下水地表水对白云岩和石灰岩等可溶性碳酸盐类岩石进行化学溶蚀,使得土壤富钙而偏碱性,成土母岩中含有大量的  $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{MgCO}_3$ ,其发育的土壤多为碱性钙质土,土壤富含 Ca、Mg 元素,不仅影响了喀斯特地区土壤的理化性质,也使其地区的植物为适应土壤高 Ca、Mg 元素而改变对养分元素的吸收,这样的改变发生在植物体吸收、转运、积累等各个环节<sup>[21]</sup>。有相关研究对植物叶片 Ca、Mg 元素含量定量分析,将喀斯特植物分为不同的钙生特性:(Ca+Mg) 高于 40 g/kg 为专性钙生植物或嗜钙植物,(Ca+Mg) 在 30~40 g/kg 为喜钙型植物,(Ca+Mg) 在 14~25 g/kg 之间的为随遇型植物,(Ca+Mg) 在 13 g/kg 以下为厌钙型植物<sup>[22]</sup>。高钙型植物对 Ca 具有较强的富集能力,即使生长在低 Ca 元素的非喀斯特土壤上(如酸性土),也可维持较高的 Ca,其体内较高的 Ca 浓度得益于对该元素较强的吸收和转运能力,使其对 Ca 有高需求量和忍耐力;低钙型植物即使在 Ca、Mg 含量高的土壤中仍然会维持较低的 Ca、Mg 含量,很少因为土壤含量高而大量吸收;随遇型植物自身 Ca 含量变化会受环境中 Ca、Mg 含量的影响。本研究中,喀斯特与非喀斯特地区植物(Ca+Mg)均小于 13 g/kg,由此看出喀斯特与非喀斯特植物均为低钙型植物。

### 3.2 环境因子对植物叶片养分特征的影响

大量学者都探究过环境因子对植物叶片养分特征的影响。Reich 等<sup>[12]</sup>认为植物叶片的 N、P 元素含量随着纬度的升高而显著增加,N/P 比值则呈相反趋势;姜沛沛等<sup>[23]</sup>发现植物叶片 N 含量随温度的升高而升高。她将这种现象归因于树种的广生态位以及较大的纬度变化幅度,表明在较小区域尺度上,植物叶片的化学计量特征与环境因子的关系存在比较大的变异性。Han 等<sup>[24]</sup>认为植物叶片 N、P 元素含量随着纬度的升高和温度的降低而显著增加,但是 N/P 与纬度和温度变化没有明显的相关性。本研究中,植物叶片 N、P 元素含量与纬度的关

系与上述研究完全相反,这与姜沛沛等<sup>[23]</sup>的研究结果相同,非喀斯特地区植物叶片 N/P 比与纬度呈显著正相关关系,这与 Zheng 等<sup>[25]</sup>研究 126 个植物叶片样品后的 N/P 比值随着纬度显著增加研究结论相同,而喀斯特地区植物叶片 N/P 比随着纬度的升高呈先升高后降低的趋势,可能是本研究的采样地之间其他的环境因素(海拔、温度、降水等)不尽相同导致的。本研究对象为西南喀斯特地区亚热带的植物,组成丰富、生活型复杂,不同岩性下的植物对于不同的生长环境具有不同的适应策略,这是植物在长期的进化过程中形成的,并且与植物本身的遗传特性有关。

## 4 结 论

(1)西南地区植物均为低钙型植物,喀斯特地区植物叶片 Ca、Mg 元素含量显著高于非喀斯特地区,K 元素显著低于非喀斯特地区植物。喀斯特地区和非喀斯特地区植物在生长过程中都受到了 N 元素的限制,不受 K 元素的限制。

(2)在喀斯特和非喀斯特地区中,随着纬度的升高,N、P 均呈现下降趋势,而 N/P、N/K 和 K/P 都是随着纬度的升高而显著上升,可以看出在西南地区,随着纬度的升高,喀斯特与非喀斯特地区的植物都会更容易受到 N 元素的限制,同时植物也会减少对 K 元素、P 元素的吸收。

(3)喀斯特与非喀斯特地区的植物叶片 N 与 P、K、Mg 之间呈显著的正相关关系( $P < 0.05$ ),K 与 Mg 之间呈显著正相关关系( $P < 0.05$ ),说明植物 N 与 P、K、Mg 吸收,K 与 Mg 吸收成一定的比例。

### 参考文献:

- [1] 贺金生,韩兴国.生态化学计量学:探索从个体到生态系统的统一化理论[J].植物生态学报,2010,34(1):2-6.
- [2] 田地,严正兵,方精云.植物生态化学计量特征及其主要假说[J].植物生态学报,2021,45(7):682-713.
- [3] TAIZ L,ZEIGER E. Plant physiology[M]. 5th ed. Sunderland, Mass.: Sinauer Associates, 2010.
- [4] ZHANG J H, LI M X, XU L, et al. C : N : P stoichiometry in terrestrial ecosystems in China[J]. The Science of the Total Environment, 2021, 795: 148849.
- [5] GÜSEWELL S. N : P ratios in terrestrial plants: Variation and functional significance[J]. The New Phytologist, 2004, 164(2): 243-266.

- [6] ELSER J J, ACHARYA K, KYLE M, et al. Growth rate-stoichiometry couplings in diverse biota [J]. *Ecology Letters*, 2003, 6(10): 936-943.
- [7] MAKINO W, COTNER J B, STERNER R W, et al. Are bacteria more like plants or animals? Growth rate and resource dependence of bacterial C : N : P stoichiometry [J]. *Functional Ecology*, 2003, 17(1): 121-130.
- [8] NIKLAS K J, COBB E D. N, P, and C stoichiometry of *Eranthis hyemalis* (Ranunculaceae) and the allometry of plant growth [J]. *American Journal of Botany*, 2005, 92(8): 1256-1263.
- [9] NIKLAS K J. Plant allometry, leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry, and interspecific trends in annual growth rates [J]. *Annals of Botany*, 2006, 97(2): 155-163.
- [10] 刘娜, 喻理飞, 赵庆, 等. 喀斯特高原石漠化区次生林叶片—枯落物—土壤连续体碳氮磷生态化学计量特征 [J]. *应用与环境生物学报*, 2020, 26(3): 681-688.
- [11] WRIGHT I J, REICH P B, WESTOBY M, et al. The worldwide leaf economics spectrum [J]. *Nature*, 2004, 428(6985): 821-827.
- [12] REICH P B, OLEKSYN J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(30): 11001-11006.
- [13] 杨幸, 王平, 高大威, 等. 云南药山自然保护区黄背栎林和巧家五针松林生态化学计量特征 [J]. *生态学报*, 2019, 39(11): 4021-4028.
- [14] 胡培雷, 王克林, 曾昭霞, 等. 喀斯特石漠化地区不同退耕年限下桂牧 1 号杂交象草植物-土壤-微生物生态化学计量特征 [J]. *生态学报*, 2017, 37(3): 896-905.
- [15] 王世杰. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨 [J]. *中国岩溶*, 2002, 21(2): 101-105.
- [16] 王世杰, 李阳兵, 李瑞玲. 喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理 [J]. *第四纪研究*, 2003, 23(6): 657-666.
- [17] 郭屹立, 李冬兴, 王斌, 等. 北热带喀斯特季节性雨林土壤和 6 个常见树种凋落物的 C、N、P 化学计量学特征 [J]. *生物多样性*, 2017, 25(10): 1085-1094.
- [18] 刘立斌, 钟巧连, 倪健. 贵州高原型喀斯特次生林 C、N、P 生态化学计量特征与储量 [J]. *生态学报*, 2019, 39(22): 8606-8614.
- [19] TIAN D, YAN Z B, NIKLAS K J, et al. Global leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry and their scaling exponent [J]. *National Science Review*, 2018, 5(5): 728-739.
- [20] OLDE VENTERINK H, WASSEN M J, VERKROOST A W M, et al. Species richness-productivity patterns differ between N-, P-, and K-limited wetlands [J]. *Ecology*, 2003, 84(8): 2191-2199.
- [21] 姬飞腾, 李楠, 邓馨. 喀斯特地区植物钙含量特征与高钙适应方式分析 [J]. *植物生态学报*, 2009, 33(5): 926-935.
- [22] 屠玉麟. 贵州喀斯特灌丛区系与生态特征分析 [J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 1995, 13(3): 1-8.
- [23] 姜沛沛, 曹扬, 陈云明, 等. 陕西省 3 种主要树种叶片、凋落物和土壤 N、P 化学计量特征 [J]. *生态学报*, 2017, 37(2): 443-454.
- [24] HAN W X, FANG J Y, GUO D L, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China [J]. *The New Phytologist*, 2005, 168(2): 377-385.
- [25] ZHENG S X, SHANGGUAN Z P. Spatial patterns of leaf nutrient traits of the plants in the Loess Plateau of China [J]. *Trees*, 2007, 21(3): 357-370.

责任编辑:朱敏杰  
英文校对:王芬

# 《湖南生态科学学报》投稿指南

《湖南生态科学学报》(ISSN 2095-7300/CN 43-1522/Q)是国内外公开发行的生态类学术期刊,主要刊登农林、生物、环境、生态等专业领域基础理论和应用技术研究方面的学术论文,包括研究报告、研究简报、文献综述与调查报告等。中国学术期刊影响因子年报(2023版)复合影响因子1.080,综合影响因子0.810,入选《中国学术期刊评价》(RCCSE)核心期刊A区、《中国职业高等院校期刊AMI综合评价(2022年)》核心期刊。

## 1 来稿项目

来稿必须包括(按顺序)题目、作者姓名、作者单位全称(有二级单位的必须标明二级单位)、所在城市、邮政编码、中文摘要、关键词、英文题目、作者英文姓名、作者单位英文全称、英文摘要、英文关键词、正文、参考文献等内容。

## 2 题名

应简明、具体,正确表达文章内容,一般不超过26个字,应尽量不用副标题。

## 3 作者与单位

多位作者姓名用逗号隔开。所有作者均须注明所在单位全称、城市及邮编。

## 4 汉语姓名译法

须执行GB/T 28039—2011《中国人名汉语拼音字母拼写规则》。姓在前名在后,姓用大写字母,名首字母大写,双名字中间加一短线(如:李爱英,LI Aiying; 旦增卓嘎,Danzeng-Zhuoga)。

## 5 中、英文摘要

中文摘要采用报道式文体,应反映论文的主要创新内容,给出重要结果和数据,并有自明性,包括研究“目的、方法、结果、结论”,并分4个部分撰写(综述性论文可有所区别),一般在500~800字(符)。

英文摘要用第三人称,时态保持一致。准确、完整、明确并能精练地概括文章的主要研究结果和结论,无语言文字错误。英文摘要包括题目,作者姓名(汉语拼音)及单位名称(与中文对应一致),研究摘要及关键词,中、英文关键词须一一对应。

## 6 首页脚注标识项目

基金项目:基金项目名称(项目编号)。作者简介包括:通信作者及第一作者的姓名,学位,职称或职务,主要研究方向及E-mail。

## 7 正文

研究论文包括引言/前言(不列出该标题)、材料与方法、结果与分析、讨论与结论等要素。各层次标题用阿拉伯数字连续编号,如1, 1.1, 1.1.1; 2, 2.1, 2.1.1……层次划分一般不超过3级。

## 8 图和表

文章可附必要的图和表,忌与文字表述重复。图表名及表第一行、第一列文字应有中英文对照。图要大小适中,清晰,标注完整。表采用三线表设计,表的主题标目要明确。

## 9 量和单位

量名称及其符号须符合国家标准GB 3100—1993《国际单位制及其应用》,采用法定计量单位及国际通用符号。书写要规范化,并注明外文字母的大小写、正斜体及上下角标,数字与单位须间隔半个字符。容易混淆的字母、符号,请特别注明。

## 10 参考文献

须执行GB/T 7714—2015《信息与文献 参考文献著录规则》。如:

专著参考文献格式:著者.书名[M].版本(初版省略).出版地,出版者,出版年.

期刊参考文献格式:作者(以逗号分隔).题名[J].刊名(全称),出版年.卷(期):起-止页.

学位论文参考文献格式:作者.题名[D].保存地点:保存单位,出版年.

欢迎您的关注与投稿。本刊不收取版面费及审稿费等任何费用,稿件一经录用1~3个月即可发表。

投稿网站: <http://www.hnstkxxb.com> <https://publish.cnki.net/hnhs>

投稿邮箱: 2514634782@qq.com

联系电话: 0734-8591122

# 湖南生态科学学报

HUNAN SHENGTAI KEXUE XUEBAO

(季刊 1995年创刊)

2024年 第11卷 第2期

主管单位：湖南省教育厅

主办单位：湖南环境生物职业技术学院

编辑出版：《湖南生态科学学报》编辑部

(湖南省衡阳市石鼓区望城路165号 邮编：421005)

电话：0734-8591122

邮箱：2514634782@qq.com

主编：梁忠厚 颜晓元

印刷：长沙市和一印刷设备有限公司

发行订阅：《湖南生态科学学报》编辑部

学报官网：www.hnstkxxb.com

投稿网址：hnhs.cbpt.cnki.net

publish.cnki.net/hnhs

出版日期：2024年6月25日

## Journal of Hunan Ecological Science

(Quarterly, Started in 1995)

Vol.11 No.2 2024

Supervisor: Education Department of Hunan Province

Sponsor: Hunan Polytechnic of Environment and Biology

Edited and Published by: Editorial Department of Journal of Hunan Ecological Science

(165 Wangcheng Road, Shigu District, Hengyang 421005, China)

Tel.: 0734-8591122

E-mail: 2514634782@qq.com

Editor-in-chief: Liang Zhonghou, Yan Xiaoyuan

Printed by: Changsha Heyi Printing Equipment Co., Ltd.

Distributed by: Editorial Department of Journal of Hunan Ecological Science

Journal official website: www.hnstkxxb.com

Submission website: hnhs.cbpt.cnki.net

publish.cnki.net/hnhs

Published date: 25 June, 2024

ISSN 2095-7300



9 772095 730247

国内定价：10.00元