

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

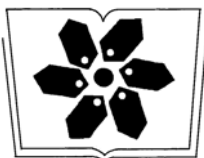
## Acta Ecologica Sinica



第32卷 第16期 Vol.32 No.16 **2012**

中国生态学会  
中国科学院生态环境研究中心  
科学出版社

主办  
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

# 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 16 期 2012 年 8 月 (半月刊)

## 目 次

|                                         |                         |
|-----------------------------------------|-------------------------|
| 基于生物多样性保护的兴安落叶松与白桦最佳混交比例——以阿尔山林区为例····· | 李 菁, 骆有庆, 石 娟 (4943)    |
| 中国能源消费碳排放的时空特征·····                     | 舒娱琴 (4950)              |
| 黄土丘陵沟壑区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因素·····           | 姚雪玲, 傅伯杰, 吕一河 (4961)    |
| 新疆艾比湖流域土壤有机质的空间分布特征及其影响因素·····          | 王合玲, 张辉国, 秦 璐, 等 (4969) |
| 雅鲁藏布江山南宽谷风沙化土地土壤养分和粒度特征·····            | 李海东, 沈渭寿, 邹长新, 等 (4981) |
| 一株溶藻细菌对海洋原甲藻的溶藻效应·····                  | 史荣君, 黄洪辉, 齐占会, 等 (4993) |
| 种形态对黑藻和竹叶眼子菜有机酸含量的影响·····               | 钟正燕, 王宏镔, 王海娟, 等 (5002) |
| 七项河流附着硅藻指数在东江的适用性评估·····                | 邓培雁, 雷远达, 刘 威, 等 (5014) |
| 杭州湾滨海湿地不同植被类型沉积物磷形态变化特征·····            | 梁 威, 邵学新, 吴 明, 等 (5025) |
| 剪形臂尾轮虫形态的时空变化及其与生态因子间的关系·····           | 葛雅丽, 席貽龙, 马 杰, 等 (5034) |
| 太湖流域河流水质状况对景观背景的响应·····                 | 周 文, 刘茂松, 徐 驰, 等 (5043) |
| 荒漠植物白刺属 4 个物种的生殖分配比较·····               | 李清河, 辛智鸣, 高婷婷, 等 (5054) |
| 臭氧浓度升高对香樟叶片光合色素及抗过氧化的影响及其氮素响应·····      | 牛俊峰, 张巍巍, 李 丽, 等 (5062) |
| 不同密度下凤仙花重要形态性状与花朵数的关系·····              | 田旭平, 常 洁, 李娟娟, 等 (5071) |
| 五种高速公路边坡绿化植物的生理特性及抗旱性综合评价·····          | 谭雪红, 高艳鹏, 郭小平, 等 (5076) |
| 散孔材与环孔材树种枝干、叶水力学特性的比较研究·····            | 左力翔, 李俊辉, 李秧秧, 等 (5087) |
| 北京城区行道树国槐叶面尘分布及重金属污染特征·····             | 戴斯迪, 马克明, 宝 乐 (5095)    |
| 南亚热带米老排人工林碳贮量及其分配特征·····                | 刘 恩, 刘世荣 (5103)         |
| 植物生活史型定量划分及其权重配置方法——以四棱豆生活史型划分为例·····   | 赵则海 (5110)              |
| 半干旱区湿地-干草原交错带边界判定及其变化·····              | 王 晓, 张克斌, 杨晓晖, 等 (5121) |
| 氮肥运筹对晚播冬小麦氮素和干物质积累与转运的影响·····           | 吴光磊, 郭立月, 崔正勇, 等 (5128) |
| 氮肥形态对冬小麦根际土壤氮素生理群活性及无机氮含量的影响·····       | 熊淑萍, 车芳芳, 马新明, 等 (5138) |
| 基于数字相机的冬小麦物候和碳交换监测·····                 | 周 磊, 何洪林, 孙晓敏, 等 (5146) |
| 黄土高原半湿润区气候变化对冬小麦生长发育及产量的影响·····         | 姚玉璧, 王润元, 杨金虎, 等 (5154) |
| 基于土地破坏的矿区生态风险评价: 理论与方法·····             | 常 青, 邱 瑶, 谢苗苗, 等 (5164) |
| 基于生态位的山地农村居民点适宜度评价·····                 | 秦天天, 齐 伟, 李云强, 等 (5175) |
| 氯虫苯甲酰胺对黑肩绿盲蝽实验种群的影响·····                | 杨 洪, 王 召, 金道超 (5184)    |
| 6 种植物次生物质对斜纹夜蛾解毒酶活性的影响·····             | 王瑞龙, 孙玉林, 梁笑婷, 等 (5191) |
| 云南元江芒果园桔小实蝇成虫日活动规律及空间分布格局·····          | 叶文丰, 李 林, 孙来亮, 等 (5199) |
| 重庆市蝴蝶多样性环境健康指示作用和环境监测评价体系构建·····        | 邓合黎, 马 琦, 李爱民 (5208)    |
| <b>专论与综述</b>                            |                         |
| 生态系统服务竞争与协同研究进展·····                    | 李 鹏, 姜鲁光, 封志明, 等 (5219) |
| 中国沿海无柄蔓足类研究进展·····                      | 严 涛, 黎祖福, 胡煜峰, 等 (5230) |
| 冰雪灾害对森林的影响·····                         | 郭淑红, 薛 立 (5242)         |
| 不同干扰因素对森林和湿地温室气体通量影响的研究进展·····          | 杨 平, 全 川 (5254)         |
| 采石场废弃地的生态重建研究进展·····                    | 杨振意, 薛 立, 许建新 (5264)    |
| <b>研究简报</b>                             |                         |
| 基于地统计学和 CFI 样地的浙江省森林碳空间分布研究·····        | 张 峰, 杜 群, 葛宏立, 等 (5275) |

期刊基本参数: CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 344 \* zh \* P \* ¥ 70.00 \* 1510 \* 36 \* 2012-08



封面图说: 秋色藏野驴群——秋天已经降临在海拔 4200 多米的黄河源区, 红色的西伯利亚蓼(生于盐碱荒地或砂质含盐碱土壤)铺满大地, 间有的高原苔草也泛出了金黄, 行走在上面的藏野驴们顾不上欣赏这美丽的秋色, 只是抓紧时间, 在严冬到来之前取食, 添肥增膘以求渡过青藏高原即将到来的漫长冬天。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

# ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 16 August, 2012 (Semimonthly)

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                        |                                                          |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| The optimum mixture ratio of larch and birch in terms of biodiversity conservation; a case study in Aershan forest area .....                                                                          | LI Jing, LUO Youqing, SHI Juan (4943)                    |
| Spatiotemporal characteristics of carbon emissions from energy consumption in China .....                                                                                                              | SHU Yuqin (4950)                                         |
| Spatial patterns of soil moisture at transect scale in the Loess Plateau of China .....                                                                                                                | YAO Xueling, FU Bojie, LÜ Yihe (4961)                    |
| The characteristics of the spatial distribution of soil organic matter and factors influencing it in Ebinur Lake Basin of Xinjiang Autonomous Region, China .....                                      | WANG Heling, ZHANG Huiguo, QIN Lu, et al (4969)          |
| Soil nutrients content and grain size fraction of aeolian sandy land in the Shannan Wide Valley of the Yarlung Zangbo River, China .....                                                               | LI Haidong, SHEN Weishou, ZOU Changxin, et al (4981)     |
| Algicidal activity against <i>Proocentrum micans</i> by a marine bacterium isolated from a HABs area, South China .....                                                                                | SHI Rongjun, HUANG Honghui, QI Zhanhui, et al (4993)     |
| Effects of arsenic speciations on contents of main organic acids in <i>Hydrilla verticillata</i> and <i>Potamogeton malaianus</i> .....                                                                | ZHONG Zhengyan, WANG Hongbin, WANG Haijuan, et al (5002) |
| Exploration of benthic diatom indices to evaluate water quality in rivers in the Dongjiang basin .....                                                                                                 | DENG Peiyan, LEI Yuanda, LIU Wei, et al (5014)           |
| Phosphorus fraction in the sediments from different vegetation type in Hangzhou bay coastal wetlands .....                                                                                             | LIANG Wei, SHAO Xuexin, WU Ming, et al (5025)            |
| Spatio-temporal variation of morphometric characteristics of <i>Brachionus forficula</i> in relation to ecological factors .....                                                                       | GE Yali, XI Yilong, MA Jie, et al (5034)                 |
| Response of river water quality to background characteristics of landscapes in Taihu Lake basin .....                                                                                                  | ZHOU Wen, LIU Maosong, XU Chi, et al (5043)              |
| Reproductive allocation in four desert species of the genus <i>Nitraria</i> L. ....                                                                                                                    | LI Qinghe, XIN Zhiming, GAO Tingting, et al (5054)       |
| Effects of elevated ozone on foliar chlorophyll content and antioxidant capacity in leaves of <i>Cinnamomum camphora</i> under enhanced nitrogen loads .....                                           | NIU Junfeng, ZHANG Weiwei, LI Li, et al (5062)           |
| Correlation analysis between floret numbers and important traits of <i>Impatiens balsamina</i> under different planting density .....                                                                  | TIAN Xuping, CHANG Jie, LI Juanjuan, et al (5071)        |
| Physiological characteristics and comprehensive evaluation of drought resistance in five plants used for roadside ecological restoration .....                                                         | TAN Xuehong, GAO Yanpeng, GUO Xiaoping, et al (5076)     |
| Comparison of hydraulic traits in branches and leaves of diffuse- and ring-porous species .....                                                                                                        | ZUO Lixiang, LI Junhui, LI Yangyang, et al (5087)        |
| Distribution and heavy metal character of foliar dust on roadside tree <i>Sophora japonica</i> of urban area in Beijing .....                                                                          | DAI Sidi, MA Keming, BAO Le (5095)                       |
| The research of carbon storage and distribution feature of the <i>Mytilaria laosensis</i> plantation in south sub-tropical area .....                                                                  | LIU En, LIU Shirong (5103)                               |
| The novel methods of quantitative classification of plant life cycle forms and weight collocation; taking classification of life cycle forms of <i>Psophocarpus tetragonolobus</i> as an example ..... | ZHAO Zehai (5110)                                        |
| Research on boundary definition and changes of wetland-dry grassland ...                                                                                                                               | WANG Xiao, ZHANG Kebin, YANG Xiaohui, et al (5121)       |
| Differential effects of nitrogen managements on nitrogen, dry matter accumulation and transportation in late-sowing winter wheat .....                                                                 | WU Guanglei, GUO Liyue, CUI Zhengyong, et al (5128)      |
| Effects of nitrogen form on the activity of nitrogen bacteria group and inorganic nitrogen in rhizosphere soil of winter wheat .....                                                                   | XIONG Shuping, CHE Fangfang, MA Xinming, et al (5138)    |
| Using digital repeat photography to model winter wheat phenology and photosynthetic CO <sub>2</sub> uptake .....                                                                                       | ZHOU Lei, HE Honglin, SUN Xiaomin, et al (5146)          |
| Impacts of climate change on growth and yield of winter wheat in the semi-humid region of the Loess Plateau .....                                                                                      | YAO Yubi, WANG Runyuan, YANG Jinhu, et al (5154)         |
| Theory and method of ecological risk assessment for mining areas based on the land destruction .....                                                                                                   | CHANG Qing, QIU Yao, XIE Miaomiao, et al (5164)          |
| Suitability evaluation of rural residential land based on niche theory in mountainous area .....                                                                                                       | QIN Tiantian, QI Wei, LI Yunqiang, et al (5175)          |
| Effects of chlorantraniliprole on experimental populations of <i>Cyrtorhinus lividipennis</i> (Reuter) (Hemiptera: Miridae) .....                                                                      | YANG Hong, WANG Zhao, JIN Daochao (5184)                 |
| Effects of six plant secondary metabolites on activities of detoxification enzymes in <i>Spodoptera litura</i> .....                                                                                   | WANG Ruilong, SUN Yulin, LIANG Xiaoting, et al (5191)    |
| Daily activity and spatial distribution pattern of the oriental fruit fly, <i>Bactrocera dorsalis</i> (Diptera: Tephritidae) in mango orchard, Yuanjiang, Yunnan .....                                 | YE Wenfeng, LI Lin, SUN Lailiang, et al (5199)           |
| The establishment of the indication on environmental health of butterfly and of the environmental monitoring evaluation system in Chongqing .....                                                      | DENG Heli, MA Qi, LI Aimin (5208)                        |
| <b>Review and Monograph</b>                                                                                                                                                                            |                                                          |
| Research progress on trade-offs and synergies of ecosystem services; an overview .....                                                                                                                 | LI Peng, JIANG Luguang, FENG Zhiming, et al (5219)       |
| A review on the balanomorph barnacles in the coastal waters of China .....                                                                                                                             | YAN Tao, LI Zufu, HU Yufeng, et al (5230)                |
| Effects of ice-snow damage on forests .....                                                                                                                                                            | GUO Shuhong, XUE Li (5242)                               |
| Greenhouse gas flux from forests and wetlands; a review of the effects of disturbance .....                                                                                                            | YANG Ping, TONG Chuan (5254)                             |
| Advances in ecology restoration of abandoned quarries .....                                                                                                                                            | YANG Zhenyi, XUE Li, XU Jianxin (5264)                   |
| <b>Scientific Note</b>                                                                                                                                                                                 |                                                          |
| Spatial distribution of forest carbon in Zhejiang Province with geostatistics based on CFI sample plots .....                                                                                          | ZHANG Feng, DU Qun, GE Hongli, et al (5275)              |



DOI: 10.5846/stxb201107101024

赵则海. 植物生活史型定量划分及其权重配置方法——以四棱豆生活史型划分为例. 生态学报, 2012, 32(16): 5110-5120.

Zhao Z H. The novel methods of quantitative classification of plant life cycle forms and weight collocation: taking classification of life cycle forms of *Psophocarpus tetragonolobus* as an example. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(16): 5110-5120.

# 植物生活史型定量划分及其权重配置方法 ——以四棱豆生活史型划分为例

赵 则 海

(肇庆学院生命科学学院, 肇庆 526061)

**摘要:**植物生活史型定量划分方法研究是植物生活史型研究的重要内容。现有的生活史型定量划分方法是基于主成分分析法 (PCA) 建立起来的, 未考虑性状指标之间的相互影响, 因此需要探索适用于“网状”结构指标体系的植物生活史型划分新方法。根据植物生活史型划分指标的层次性特点, 以攀援型和矮生型四棱豆 (*Psophocarpus tetragonolobus*) 为例, 分别采用主成分分析法 (PCA)、层次分析法 (AHP) 和网络层次分析法 (ANP) 对性状指标进行权重配置, 计算性状指标的综合得分和生活史型划分参数, 结果如下: 与 ANP 相比, PCA 计算的 V 型 (营养生长型) 参数值偏低 ( $x$  在 0.39 以下), S 型 (有性生殖型) 参数值偏高 ( $z$  在 0.453 以上); AHP 计算的 V 型参数值偏高 ( $x$  在 0.614 以上), S 型参数值偏低 ( $z$  在 0.088 以下); 3 种方法计算的生活史型划分参数差异明显。由于 PCA、AHP 均要求性状指标之间相互独立, 不能排除性状指标之间的关联, 因此基于 PCA、AHP 的四棱豆生活史型划分结果均出现了偏差, 表明性状指标之间的相关性影响了生活史型划分结果。ANP 的指标体系为“网状”结构, 其控制层、网络层各个指标之间均存在关联。构建 ANP 的判断矩阵时提取了性状指标的相关矩阵信息, 权重配置反映了性状指标之间的相关关系。基于 ANP 方法对攀援型和矮生型四棱豆生活史型的划分结果分别为  $V_{0.517} C_{0.327} S_{0.156}$  和  $V_{0.416} C_{0.43} S_{0.154}$ 。当性状指标之间的相关不显著时, 可采用 PCA 和 AHP 法分配权重; 当性状指标之间存在显著相关时, 采用 ANP 法进行权重配置更为恰当。综上所述, 基于 ANP 的植物生活史型划分方法解决了性状指标之间相互影响问题, 为植物生活史型定量研究提供了新的有效方法。

**关键词:**生活史型; 权重配置; 网络层次分析法; 四棱豆

## The novel methods of quantitative classification of plant life cycle forms and weight collocation: taking classification of life cycle forms of *Psophocarpus tetragonolobus* as an example

ZHAO Zehai

College of Life Sciences, Zhaoqing University, Zhaoqing 526061, China

**Abstract:** With the development of theoretical study on plant life cycle forms, quantitative classification methods have become one of the main research approaches in this field. The current methods for classification of plant life cycle forms are based on the principal component analysis (PCA). However, these methods just assume that plant trait indicators are independent variables and never make more serious with the interactions among target traits. Therefore, classification methods adapted for ‘mesh’ structure of plant life cycle forms need to be developed as a new indicator system. According to hierarchical characteristics of the indicator system of plant life cycle forms, both the climbing and dwarf types of *Psophocarpus tetragonolobus* were used as the experimental models to allocate the weights for trait indicators by principal

**基金项目:**中国科学院战略性先导科技专项 (XDA05050205); 广东省科技计划项目 (粤科规划字[2009]198 号)

**收稿日期:**2011-07-10; **修订日期:**2012-04-06

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhzh315@sina.com

component analysis (PCA), analytic hierarchy process (AHP) and analytic network process (ANP) respectively. The composite scores and classification parameters of trait indicators had been calculated respectively. The results were as follows: compared with ANP, parameter values ( $x$ ) of V type (vegetative growth type) was below 0.39 and parameter values ( $z$ ) of S type (sexual reproduction type) was over 0.39 by PCA, parameter values ( $x$ ) of V type was over 0.614 and parameter values ( $z$ ) of S type was below 0.088 by AHP. There were significant differences among these classification parameters of life cycle forms by three methods. For the PCA and AHP required independent trait indicators couldn't eliminate significant correlation among them, so there were deviations between the classification results based on PCA or AHP of plant life cycle forms on *P. tetragonolobus*. These results showed that the correlation of trait indicators affected classification results of life cycle forms. The indicator system of ANP is a 'mesh' structure, and indicators for control and network layer are associated with each other. To build judgement matrices of control layer and network layer on ANP, the correlation information had been extracted from correlation matrices of trait indicators and the weight distribution really reflected the relationship among trait indicators. The results based on ANP of life cycle forms in different types of climbing and dwarf for *P. tetragonolobus* were  $V_{0.517}C_{0.327}S_{0.156}$  and  $V_{0.416}C_{0.43}S_{0.154}$  respectively. If the correlation among trait indicators was not significant, both PCA and AHP can be used to calculate weights. Otherwise, the ANP is better for the case that there were significant correlation among them. To sum up, the classification method of plant life cycle forms based on ANP can be used not only to resolve the interdependence among each pair of indicators but also to provide new and effective ways for quantitative classification of plant life cycle forms.

**Key Words:** life cycle forms; weight collocation; analytic network process (ANP); *Psophocarpus tetragonolobus*

同种植物在不同的时间和空间,或不同植物在相同的时间和空间里,由于生态异质性、环境筛的选择强度变化,植物生活史在有性生殖、无性生殖和营养生长 3 个基本阶段表现出不同的配置关系,因而具有多样的植物生活史型<sup>[1]</sup>。在环境调控下,植物在完成其生活史过程中所表现出的营养生长、克隆生殖和有性生殖过程的配置关系称为植物的生活史型<sup>[2]</sup>,是该植物在特定生境条件下营养生长、克隆生殖和有性生殖过程相互权衡的结果。现有的植物生活史型定量划分方法是基于主成分分析法(principal components analysis, PCA)建立起来的,将植物的营养生长、克隆生殖和有性生殖性状参数归一化表述为  $V_{x1}C_{x2}S_{x3}$  形式<sup>[3]</sup>。由于植物的形态参数容易获得,且形态特征是其遗传物质在不同生境条件下的外在表现,因此采用植物形态性状指标进行生活史型定量划分具有很强的可操作性。一些学者采用 PCA 法对植物生活史型的研究结果表明,植物生活史型对自然生境变化、人工调控环境均较为敏感<sup>[4-7]</sup>,并证明了植物生活史型定量划分方法具有普适性。现有的植物生活史型定量划分方法在使用过程中存在如下问题:(1)当出现 2 个以上主分量时,PCA 需要引入主分量权重进行综合评分;(2)虽然主成分分析可将原始数据直接标准化,但计算综合得分时需要对原始数据归一化处理,以避免各个指标的量纲不统一对分析结果的影响。(3)构建性状指标体系时,必须要考虑指标之间的相互关联,即需要检验性状参数是否为相互独立的变量。主成分分析法的前提是假定所有性状参数是相互独立的,主分量得分系数(权重)不能反映指标之间的相互影响。如果要考虑性状参数之间的相互关系,则需要构建“网状”性状指标体系,并探索新的权重分配方法。有学者在生态健康评价指标体系分析中采用权重 2 次分配法对多层“网状”生态指标权重进行分配<sup>[8]</sup>,为解决植物生活史型划分指标之间的重叠和交叉联系问题提供了借鉴。“网状”生态指标权重分配的层次性网络层次分析法(ANP)是在层次分析方法(AHP)基础上发展起来的,用于解决网状结构问题的一种有效方法。在经济、管理以及技术领域得到了广泛应用<sup>[9]</sup>,但未见对生态学指标进行分析的资料。本文以藤本植物四棱豆(*P. tetragonolobus*)的形态性状构建其生活史型划分指标体系,对 PCA、AHP 和 ANP 3 种方法的权重配置以及生活史型划分结果进行比较,为植物生活史型理论研究探索生活史型定量划分的新方法。

## 1 实验方法

### 1.1 研究材料

在肇庆市农业良种示范推广中心种植攀援型和矮生型四棱豆,攀援型四棱豆支持物为竹竿(直径约 3 cm,高度 4 m);矮生型四棱豆没有支持物。四棱豆的播种时间为 2010 年 3 月 12 日,并确保种植条件及田间管理尽可能一致。在丰产期(7 月中旬)对矮生型四棱豆和攀援型四棱豆的形态指标进行测定,各设 10 个组,每组设 5 个重复。分别调查以下 3 类指标:营养生长指标[生长高度(cm)、主蔓长度(cm)、基径(mm)、节间长(cm)、叶片数(片/株)等],无性生殖指标[1 级分枝数(个/株)、2 级以上分枝数(个/株)、基部分枝到地面距离(cm)、休眠芽数量(个/株)、萌发芽数量(个/株)等],以及有性生殖指标[花数(枚/株)、花冠长(mm)、豆荚长(cm)、荚果数(枚/株)、种子数(枚/豆荚)等]。攀援型和矮生型四棱豆的总体性状指标见表 1。

表 1 攀援型和矮生型四棱豆生活史型划分的总体性状指标

Table 1 General morphological parameters of the *P. tetragonolobus* of climbing type and dwarf type for classification of life cycle form (means±D, n=10)

| 分类<br>Classify      | 变量<br>Var. | 形态性状<br>Morphological characteristics | 攀援型 Climbing type<br>平均数 Mean±标准差 SD | 矮生型 Dwarf type<br>平均数 Mean±标准差 SD |
|---------------------|------------|---------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| 营养生长(V)             | $V_1$      | 生长高度/cm                               | 277.196±25.225                       | 28.128±5.127                      |
| Vegetative growth   | $V_2$      | 主蔓长度/cm                               | 331.468±36.294                       | 171.447±31.679                    |
|                     | $V_3$      | 基径/mm                                 | 7.221±0.976                          | 5.986±1.115                       |
|                     | $V_4$      | 节间长/cm                                | 16.142±2.745                         | 18.738±3.091                      |
|                     | $V_5$      | 叶片数/(片/株)                             | 136.735±18.444                       | 87.768±7.963                      |
| 无性生殖(C)             | $C_1$      | 1 级分枝数/(个/株)                          | 4.346±0.997                          | 6.724±1.426                       |
| Clonal reproduction | $C_2$      | 2 级以上分枝数/(个/株)                        | 1.947±1.253                          | 3.869±1.502                       |
|                     | $C_3$      | 基部分枝到地面距离/cm                          | 30.822±5.406                         | 7.498±2.356                       |
|                     | $C_4$      | 休眠芽数量/(个/株)                           | 106.038±19.984                       | 77.224±9.915                      |
|                     | $C_5$      | 萌发芽数量/(个/株)                           | 7.917±1.677                          | 15.048±2.966                      |
| 有性生殖(S)             | $S_1$      | 花数/(枚/株)                              | 29.492±2.666                         | 14.412±2.479                      |
| Sexual reproduction | $S_2$      | 花冠长/mm                                | 34.212±2.945                         | 32.128±3.789                      |
|                     | $S_3$      | 荚果长/cm                                | 22.522±2.354                         | 19.713±2.320                      |
|                     | $S_4$      | 荚果数/(枚/株)                             | 22.816±5.717                         | 7.920±1.527                       |
|                     | $S_5$      | 种子数/(枚/荚果)                            | 15.125±2.011                         | 10.813±2.246                      |

### 1.2 指标数据归一化

为了避免指标单位对分析结果的影响,对原始数据进行归一化处理,处理后值在 0 到 1 之间<sup>[10]</sup>,采用下式计算:

$$Z_{ij} = \frac{x_{ij}}{X_{\max}}, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, m$$

式中, $Z_{ij}$ 为第  $i$  指标第  $j$  个重复观测值  $x_{ij}$  的标准化值;指标数为  $n$ ;重复数为  $m$ 。

### 1.3 权重计算

#### 1.3.1 主成分分析法(PCA)<sup>[3]</sup>

将归一化数据在 SPSS13 中进行 PCA 分析,计算各指标相关矩阵、特征向量和特征值、载荷矩阵等,确定特征值大于 1 的主成分个数。取 PCA 的得分系数向量为各指标权重。

当 PCA 超过 2 个以上主成分时,需要计算综合权重。以每个主成分所对应的特征值占所提取主成分特征值之和的比例作为综合权重,假定有  $k$  个大于 1 的特征值,即  $A_1, A_2, \dots, A_k$ ,则存在  $k$  个得分系数向量  $f_1, f_2, \dots, f_k$ ,综合权重  $f_A$  以下式计算:

$$f_A = \sum_{i=1}^k f_i \cdot \frac{A_i}{T_A}, \quad i = 1, 2, \dots, k; \quad \text{其中}, \quad T_A = \sum_{i=1}^k A_i$$

### 1.3.2 层次分析法(AHP)

基于 AHP 的植物生活史型划分的性状指标结构分 3 层,分别为目标层、中间层、指标层(图 1)。指标体系为“分叉结构”,性状指标为相互独立的。

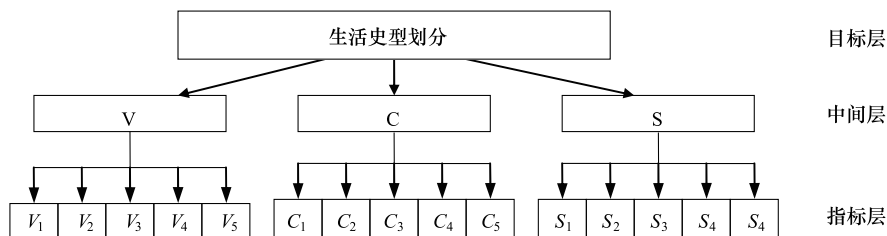


图 1 植物生活史型划分的 AHP 指标结构

Fig. 1 The index structure on AHP for the classification of life cycle form

V:营养生长 Vegetative growth; C:无性生殖 Clonal reproduction; S:有性生殖 Sexual reproduction

构建判断矩阵: AHP 多采用 1—9 标度法对指标重要性进行赋值,适用于定性指标和定量指标的判断矩阵赋值<sup>[11]</sup>。由于植物生活史型划分指标均为定量数据,笔者采用相关矩阵构建判断矩阵,将相关系数进行数据转换后用于权重计算。数据转换公式为:

$$\begin{cases} a = 10r & r \geq 0 \text{ 且 } r \neq 1 \\ a = -\frac{1}{10r} & r < 0 \end{cases}$$

式中,  $r$  为相关系数;  $a$  为判断矩阵标度值。植物性状指标的判断矩阵(表 2),在 MATLAB 中计算特征向量和最大特征根。特征向量的归一化结果即为权重向量。

判断矩阵调整:如果判断矩阵的一致性指标 ( $CR$ )  $CR < 0.1$ ,则判断矩阵达到一致性要求,特征向量的归一化向量即为权重向量。如果判断矩阵的一致性指标  $CR > 0.1$ ,判断矩阵需要调整。通过逐步调节判断矩阵中不一致偏差大的标度值,使判断矩阵一致性指标满足  $CR < 0.1$ <sup>[12]</sup>。

### 1.3.3 网络层次分析法(ANP)

与 AHP 相比,ANP 考虑了植物性状指标之间的相关性,各层指标为网络结构。基于 ANP 的植物生活史型划分的性状指标结构分 3 层,即目标层、控制层和网络层;其中,控制层、网络层各个指标之间均存在关联,指标体系均为网络结构(图 2 和图 3)。

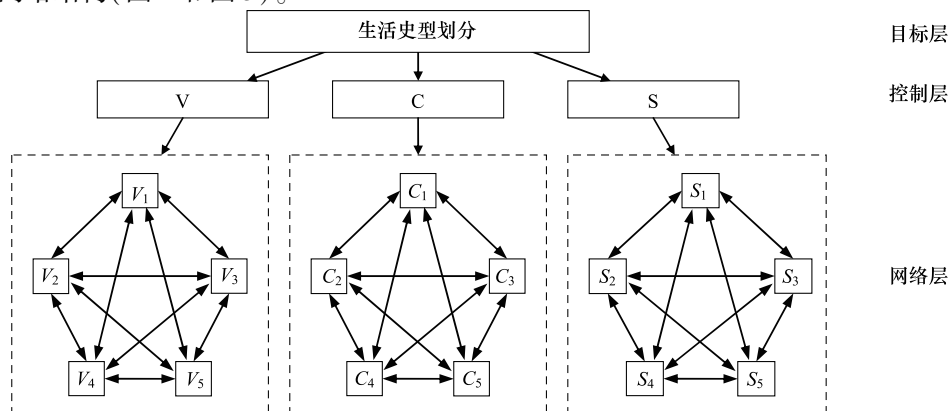


图 2 植物生活史型划分的 ANP 指标网络结构

Fig. 2 The index network structure on ANP for the classification of life cycle form

ANP 的控制层指标、网络层指标判断矩阵构建方法同 AHP。在 SUPER DECISIONS 软件中分别计算营养生长、无性生殖和有性生殖网络层指标的超矩阵、加权超矩阵、极限超矩阵,计算网络层指标权重向量。

控制层指标相关矩阵从营养生长、无性生殖和有性生殖的综合得分计算,并构建控制层判断矩阵,计算控制层指标的超矩阵、加权超矩阵、极限超矩阵,计算控制层指标权重向量。

#### 1.4 植物生活史型划分参数计算

##### 1.4.1 综合得分计算

将植物生活史型划分指标数据归一化处理后,分别计算营养生长、无性生殖和有性生殖的综合得分。综合得分计算公式如下:

$$f = \sum_{i=1}^n Z_i \cdot w_i \quad i=1, 2, \dots, n;$$

式中, $f$  为综合得分; $Z_i$  为归一化的指标数据; $w_i$  为指标权重; $n$  为指标数量。

如综合得分存在负值,需要将综合得分进行数据转换,计算公式为:

$$Z_f = 10^f$$

式中, $Z_f$  为指数变换数据; $f$  为综合得分。

设营养生长、无性生殖和有性生殖的权重分别为  $w_v$ 、 $w_c$ 、 $w_s$  (PCA 无此步骤),加权后综合得分计算公式如下:

$$F_v = f \cdot w_v; F_c = f \cdot w_c; F_s = f \cdot w_s$$

式中, $F_v$ 、 $F_c$ 、 $F_s$  分别为营养生长、无性生殖和有性生殖加权后的综合得分。

##### 1.4.2 生活史型划分参数计算

植物生活史型划分的 V 型参数、C 型参数和 S 型参数计算公式如下:

$$x = \frac{F_v}{F_v + F_c + F_s}; y = \frac{F_c}{F_v + F_c + F_s}; z = \frac{F_s}{F_v + F_c + F_s}$$

式中, $x$ 、 $y$ 、 $z$  分别为 V 型参数、C 型参数和 S 型参数,且  $x+y+z=1$ 。

植物生活史型以  $V_x C_y S_z$  的形式表示。

#### 1.5 数据分析方法

PCA 在 SPSS13.0 中处理;AHP 在 Excel 和 MATLAB6.0 中处理;ANP 在 EXCEL 和 SUPER DECISIONS 中处理。

## 2 研究结果

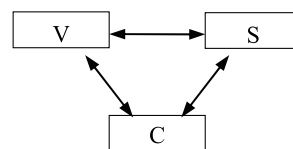
### 2.1 基于 PCA 的生活史型划分结果

分别对四棱豆的营养生长、无性生殖和有性生殖指标数据进行归一化处理,并进行主成分分析,营养生长、无性生殖和有性生殖过程均各提取 1 个主成分(特征值均大于 1),其贡献率分别为 66.35%、72.14% 和 63.27%。营养生长、无性生殖和有性生殖过程各变量的主分量得分系数向量见表 3。

表 3 四棱豆不同生活史过程的主分量得分系数向量

Table 3 The coefficient vectors of principal components in different periods of life histories of *P. tetragonolobus*

| 营养生长<br>Vegetative growth |          | 无性生殖<br>Clonal reproduction |          | 有性生殖<br>Sexual reproduction |          |
|---------------------------|----------|-----------------------------|----------|-----------------------------|----------|
| 变量 Var.                   | 系数 Coef. | 变量 Var.                     | 系数 Coef. | 变量 Var.                     | 系数 Coef. |
| $V_1$                     | 0.287    | $C_1$                       | 0.231    | $S_1$                       | 0.280    |
| $V_2$                     | 0.285    | $C_2$                       | 0.236    | $S_2$                       | 0.174    |
| $V_3$                     | 0.204    | $C_3$                       | -0.242   | $S_3$                       | 0.224    |
| $V_4$                     | -0.152   | $C_4$                       | -0.219   | $S_4$                       | 0.287    |
| $V_5$                     | 0.270    | $C_5$                       | 0.248    | $S_5$                       | 0.273    |



V: 营养生长; C: 无性生殖; S: 有性生殖

图 3 控制层指标的网络结构

Fig. 3 The network structure for indicators of control layer



以得分系数向量为权重向量计算综合得分,生活史型划分结果见图4。攀援型四棱豆生活史型划分参数中,V型参数值( $x$ )在0.269—0.390之间,C型参数值( $y$ )在0.035—0.078之间,S型参数值( $z$ )在0.569—0.696之间。攀援型四棱豆生活史型总体上以 $V_{0.323}C_{0.053}S_{0.624}$ ( $x$ 、 $y$ 、 $z$ 为平均值,下同)为中心,表明攀援型四棱豆为有性生殖发达、营养生长次之、无性生殖最弱。矮生型四棱豆的V型参数值( $x$ )在0.175—0.292之间,C型参数值( $y$ )在0.194—0.336之间,S型参数值( $z$ )在0.453—0.561之间。矮生型四棱豆生活史型总体上以 $V_{0.218}C_{0.262}S_{0.520}$ 为中心,表明矮生型四棱豆为有性生殖发达、无性生殖次之、营养生长最弱。PCA法很好地将攀援型和矮生型四棱豆的生活史型区分开,也反映了矮生型四棱豆无性生殖高于攀援型的典型特征,但将V型参数值( $x$ )过低,S型参数值( $z$ )过高。甚至出现攀援型四棱豆的V型参数值( $x$ )比矮生型还低,而田间试验中攀援型四棱豆营养生长明显高于矮生型,显然,基于PCA法的生活史型划分结果存在偏差。

## 2.2 生活史型划分指标的相关分析

营养生长参数 $V_4$ (节间长)与 $V_1$ (生长高度)、 $V_2$ (主蔓长度)、 $V_3$ (基径)、 $V_5$ (叶片数)之间均为不显著负相关;除此之外,各参数之间均存在显著或极显著的正相关(表4)。营养生长性状指标均不是相互独立的变量。

无性生殖性状指标之间均存在显著相关(表5)。其中 $C_1$ (1级分枝数)与 $C_2$ (2级以上分枝数)、 $C_1$ 与 $C_5$ 、 $C_2$ 与 $C_5$ 、 $C_3$ (基部分枝到地面距离)与 $C_4$ (休眠芽数量)、 $C_5$ (萌发芽数量)之间均存在不同程度的正相关,其余变量之间均存在负相关。无性生殖性状指标之间均不是相互独立的变量。

表4 四棱豆营养生长性状指标的相关矩阵

Table 4 The correlation matrix of vegetative growth indicators of *P. tetragonolobus*

| 变量 Var. | $V_1$ | $V_2$    | $V_3$    | $V_4$  | $V_5$    |
|---------|-------|----------|----------|--------|----------|
| $V_1$   | 1     | 0.951 ** | 0.517 *  | -0.375 | 0.860 ** |
| $V_2$   |       | 1        | 0.565 ** | -0.386 | 0.792 ** |
| $V_3$   |       |          | 1        | -0.199 | 0.489 *  |
| $V_4$   |       |          |          | 1      | -0.349   |
| $V_5$   |       |          |          |        | 1        |

\* 在0.05水平相关显著; \*\* 在0.01水平相关显著

表5 四棱豆无性生殖性状指标的相关矩阵

Table 5 The correlation matrix of clonal reproduction indicators of *P. tetragonolobus*

| 变量 Var. | $C_1$ | $C_2$    | $C_3$     | $C_4$     | $C_5$     |
|---------|-------|----------|-----------|-----------|-----------|
| $C_1$   | 1     | 0.683 ** | -0.632 ** | -0.555 *  | 0.668 **  |
| $C_2$   |       | 1        | -0.591 ** | -0.588 ** | 0.750 **  |
| $C_3$   |       |          | 1         | 0.679 **  | -0.794 ** |
| $C_4$   |       |          |           | 1         | -0.565 ** |
| $C_5$   |       |          |           |           | 1         |

\* 在0.05水平相关显著; \*\* 在0.01水平相关显著

有性生殖性状指标之间均存在不同程度的正相关(表6)。其中 $S_1$ (花数)与 $S_2$ (花冠长)、 $S_2$ 与 $S_4$ (荚果数)、 $S_2$ 与 $S_5$ (种子数)之间均为正相关,但未均达到显著水平。其余指标之间均为显著或极显著正相关。有性生殖性状指标之间均不是相互独立的变量。

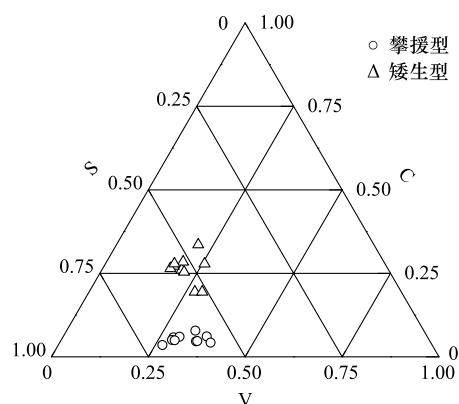


图4 基于PCA的攀援型和矮生型四棱豆生活史型划分结果

Fig. 4 The classification results of life cycle form on *P. tetragonolobus* of climbing type and dwarf type based on PCA

表 6 四棱豆有性生殖性状指标的相关矩阵

Table 6 The correlation matrix of sexual reproduction indicators of *P. tetragonolobus*

| 变量 Var. | $S_1$ | $S_2$ | $S_3$   | $S_4$    | $S_5$    |
|---------|-------|-------|---------|----------|----------|
| $S_1$   | 1     | 0.331 | 0.478 * | 0.883 ** | 0.684 ** |
| $S_2$   |       | 1     | 0.477 * | 0.271    | 0.365    |
| $S_3$   |       |       | 1       | 0.483 *  | 0.476 *  |
| $S_4$   |       |       |         | 1        | 0.799 ** |
| $S_5$   |       |       |         |          | 1        |

\* 在 0.05 水平相关显著; \*\* 在 0.01 水平相关显著

生活史型划分指标相关分析表明四棱豆的营养生长、无性生殖、有性生殖性状指标均不是相互独立的,部分指标之间的相关达到极显著水平,变量之间存在不同程度的信息重叠。因此,对四棱豆生活史型划分时应考虑指标之间的关联。

2.3 基于 AHP 的生活史型划分结果

相关分析表明性状指标之间存在相互关联,需要对性状指标的重要性进行判断。分别用营养生长、无性生殖、有性生殖性状指标的相关矩阵构建指标层判断矩阵(相关矩阵见表 4、表 5 和表 6)。营养生长指标层判断矩阵的平均随机一致性指标  $CR=0.987>0.1$ ,判断矩阵需要调节。经一致性优化,得到判断矩阵(表 7), $CR=0.079<0.1$ ,表明具有良好的一致性。

表 7 营养生长指标的判断矩阵

Table 7 The judgement matrix of vegetative growth indicators

| 变量 Var. | $V_1$ | $V_2$ | $V_3$ | $V_4$ | $V_5$ |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $V_1$   | 1     | 6.000 | 5.170 | 3.800 | 3.000 |
| $V_2$   | 0.167 | 1     | 2.000 | 0.259 | 0.500 |
| $V_3$   | 0.193 | 0.500 | 1     | 0.333 | 0.204 |
| $V_4$   | 0.263 | 3.860 | 3.000 | 1     | 3.000 |
| $V_5$   | 0.333 | 2.000 | 4.890 | 0.333 | 1     |

无性生殖指标层判断矩阵的  $CR=1.16>0.1$ ,经一致性优化,得到判断矩阵(表 8), $CR=0.090<0.1$ ,具有良好的一致性。

表 8 无性生殖指标的判断矩阵

Table 8 The judgement matrix of clonal reproduction indicators

| 变量 Var. | $C_1$ | $C_2$ | $C_3$ | $C_4$ | $C_5$ |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $C_1$   | 1     | 6.825 | 0.500 | 5.500 | 6.681 |
| $C_2$   | 0.147 | 1     | 0.169 | 0.170 | 1.000 |
| $C_3$   | 2.000 | 5.912 | 1     | 6.788 | 7.943 |
| $C_4$   | 0.182 | 5.877 | 0.147 | 1     | 3.000 |
| $C_5$   | 0.150 | 1.000 | 0.126 | 0.333 | 1     |

有性生殖指标层判断矩阵的  $CR=0.63>0.1$ ,经一致性优化,得到判断矩阵(表 9), $CR=0.078<0.1$ ,具有良好的一致性。

中间层的相关矩阵见表 10,指标之间存在极显著正相关。建立判断矩阵的一致性指标  $CR=0.322>0.1$ ,需要对判断矩阵进行调整。经一致性优化,得到调整后的判断矩阵(表 11), $CR=0.069<0.1$ ,满足一致性要求。

分别用四棱豆营养生长、无性生殖、有性生殖性状的指标层判断矩阵计算权重向量;根据中间层的相关矩阵和判断矩阵计算中间层权重。中间层权重和指标层权重向量见表 12。 $V_4$ 权重高达 0.712, $S_5$ 权重仅 0.06。

表 9 有性生殖指标的判断矩阵

Table 9 The judgement matrix of sexual reproduction indicators

| 变量 Var. | $S_1$ | $S_2$ | $S_3$ | $S_4$ | $S_5$ |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $S_1$   | 1     | 3.310 | 7.000 | 8.829 | 6.838 |
| $S_2$   | 0.302 | 1     | 4.770 | 2.712 | 3.653 |
| $S_3$   | 0.143 | 0.210 | 1     | 0.208 | 0.500 |
| $S_4$   | 0.113 | 0.369 | 4.800 | 1     | 3.000 |
| $S_5$   | 0.146 | 0.274 | 2.000 | 0.333 | 1     |

表 10 中间层指标的相关矩阵

Table 10 The correlation matrix of middle layer indicators

| 变量 Var. | $V_V$ | $C_C$    | $S_S$    |
|---------|-------|----------|----------|
| $V_V$   | 1     | 0.731 ** | 0.949 ** |
| $C_C$   |       | 1        | 0.745 ** |
| $S_S$   |       |          | 1        |

1.  $V_V$ 、 $C_C$ 、 $S_S$ 分别为控制层变量;2. \* \* 在 0.01 水平相关显著

表 11 中间层指标的判断矩阵

Table 11 The judgement matrix of middle layer indicators

| 变量 Var. | $V_V$ | $C_C$ | $S_S$ |
|---------|-------|-------|-------|
| $V_V$   | 1     | 4     | 9.49  |
| $C_C$   | 0.25  | 1     | 5     |
| $S_S$   | 0.11  | 0.20  | 1     |

$V_V$ 、 $C_C$ 、 $S_S$ 分别为控制层变量

表 12 基于 AHP 的四棱豆生活史型划分参数的权重向量

Table 12 The weighting vectors of classification parameters of life cycle form of *P. tetragonolobus* based on AHP

| 营养生长<br>Vegetative growth |              | 无性生殖<br>Clonal reproduction |              | 有性生殖<br>Sexual reproduction |              |
|---------------------------|--------------|-----------------------------|--------------|-----------------------------|--------------|
| 变量 Var.                   | 权重 Weighting | 变量 Var.                     | 权重 Weighting | 变量 Var.                     | 权重 Weighting |
| $V_V$                     | 0.712        | $C_C$                       | 0.229        | $S_S$                       | 0.060        |
| $V_1$                     | 0.481        | $C_1$                       | 0.331        | $S_1$                       | 0.567        |
| $V_2$                     | 0.075        | $C_2$                       | 0.044        | $S_2$                       | 0.211        |
| $V_3$                     | 0.055        | $C_3$                       | 0.465        | $S_3$                       | 0.041        |
| $V_4$                     | 0.238        | $C_4$                       | 0.117        | $S_4$                       | 0.120        |
| $V_5$                     | 0.151        | $C_5$                       | 0.044        | $S_5$                       | 0.061        |

$V_V$ 、 $C_C$ 、 $S_S$ 分别为控制层变量; $V_{1-5}$ 、 $C_{1-5}$ 、 $S_{1-5}$ 为指标层变量

以权重向量计算营养生长、无性生殖、有性生殖性状指标综合得分,以中间层权重计算综合得分加权平均数,生活史型划分结果见图 5。攀援型四棱豆 V 型参数值( $x$ )在 0.716—0.785 之间,C 型参数值( $y$ )在 0.148—0.226 之间,S 型参数值( $z$ )在 0.058—0.076 之间。攀援型四棱豆生活史型总体上以  $V_{0.745}C_{0.187}S_{0.068}$  为中心。矮生型四棱豆的 V 型参数值( $x$ )在 0.614—0.716 之间,C 型参数值( $y$ )在 0.210—0.305 之间,S 型参数值( $z$ ) 在 0.061—0.088 之间。矮生型四棱豆生活史型总体上以  $V_{0.664}C_{0.258}S_{0.077}$  为中心。AHP 区分攀援型和矮生型四棱豆生活史型效果明显,攀援型和矮生型四棱豆均为营养生长发达、有性生殖次之、无性生殖最弱。基于 AHP 的生活史型划分结果反映了矮生型四棱豆无性生殖高于攀援型的典型特征,但 S 型参数值均过低。矮生型四棱豆 S 型参数值甚至略高于攀援型,实际上矮生型四棱豆的有性生殖低于攀援型,生活史型划分结果出现偏差。

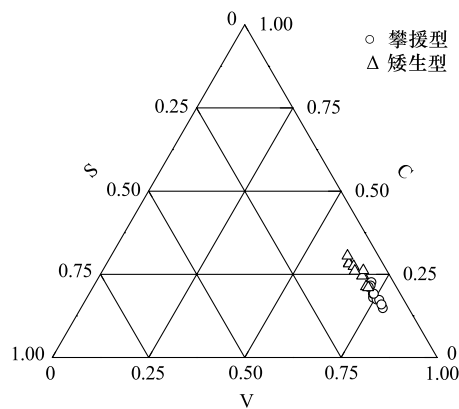


图 5 基于 AHP 的攀援型和矮生型四棱豆生活史型划分结果

Fig. 5 The classification results of life cycle form on *P. tetragonolobus* of climbing type and dwarf type based on AHP

2.4 基于 ANP 的生活史型划分结果

控制层指标的相关矩阵见表 13, 指标之间均为极显著正相关。

ANP 的控制层指标和网络层指标均为网络结构。网络层指标的判断矩阵构建方法同 AHP(表 7、表 8 和表 9)。控制层指标的判断矩阵一致性指标  $CR=0.129>0.1$ , 经一致性优化, 得到调整后的判断矩阵(表 14), 判断矩阵  $CR=0.070<0.1$ , 满足一致性要求。

分别计算网络层、控制层的权重向量, 结果见表 15。

| 表 13 控制层指标的相关矩阵                                             |       |          |          | 表 14 控制层指标的判断矩阵                                           |       |       |       |
|-------------------------------------------------------------|-------|----------|----------|-----------------------------------------------------------|-------|-------|-------|
| Table 13 The correlation matrix of control layer indicators |       |          |          | Table 14 The judgement matrix of control layer indicators |       |       |       |
| 变量 Var.                                                     | $V_V$ | $C_C$    | $S_S$    | 变量 Var.                                                   | $V_V$ | $C_C$ | $S_S$ |
| $V_V$                                                       | 1     | 0.520 ** | 0.938 ** | $V_V$                                                     | 1     | 5.197 | 9.383 |
| $C_C$                                                       |       | 1        | 0.550 ** | $C_C$                                                     | 0.192 | 1     | 4.000 |
| $S_S$                                                       |       |          | 1        | $S_S$                                                     | 0.107 | 0.250 | 1     |

$V_V$ 、 $C_C$ 、 $S_S$ 分别为控制层变量; \* \* 在 0.01 水平相关显著

$V_V$ 、 $C_C$ 、 $S_S$ 分别为控制层变量

表 15 基于 ANP 的四棱豆生活史型划分参数的权重向量

| Table 15 The weighting vectors of classification parameters of life cycle form of <i>P. tetragonolobus</i> based on ANP |              |                             |              |                             |              |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------------------------|--------------|-----------------------------|--------------|
| 营养生长<br>Vegetative growth                                                                                               |              | 无性生殖<br>Clonal reproduction |              | 有性生殖<br>Sexual reproduction |              |
| 变量 Var.                                                                                                                 | 权重 Weighting | 变量 Var.                     | 权重 Weighting | 变量 Var.                     | 权重 Weighting |
| $V_V$                                                                                                                   | 0.470        | $C_C$                       | 0.397        | $S_S$                       | 0.132        |
| $V_1$                                                                                                                   | 0.361        | $C_1$                       | 0.328        | $S_1$                       | 0.395        |
| $V_2$                                                                                                                   | 0.138        | $C_2$                       | 0.076        | $S_2$                       | 0.278        |
| $V_3$                                                                                                                   | 0.069        | $C_3$                       | 0.350        | $S_3$                       | 0.058        |
| $V_4$                                                                                                                   | 0.215        | $C_4$                       | 0.158        | $S_4$                       | 0.178        |
| $V_5$                                                                                                                   | 0.216        | $C_5$                       | 0.087        | $S_5$                       | 0.089        |

$V_V$ 、 $C_C$ 、 $S_S$ 分别为控制层变量;  $V_{1-5}$ 、 $C_{1-5}$ 、 $S_{1-5}$ 为指标层变量

以权重向量计算营养生长、无性生殖、有性生殖性状指标综合得分, 以控制层权重计算综合得分加权平均数, 基于 ANP 的生活史型划分结果见图 6。攀援型四棱豆 V 型参数值( $x$ ) 在 0.487—0.57 之间, C 型参数值( $y$ ) 在 0.272—0.382 之间, S 型参数值( $z$ ) 在 0.131—0.169 之间。攀援型四棱豆生活史型总体上以  $V_{0.517}C_{0.327}S_{0.156}$  为中心, 表明攀援型四棱豆营养生长发达、无性生殖次之、有性生殖均较弱。矮生型四棱豆的 V 型参数值( $x$ ) 在 0.371—0.471 之间, C 型参数值( $y$ ) 在 0.372—0.473 之间, S 型参数值( $z$ ) 在 0.129—0.166 之间。矮生型四棱豆生活史型总体上以  $V_{0.416}C_{0.43}S_{0.154}$  为中心, 表明矮生型四棱豆为无性生殖较为发达、营养生长次之、有性生殖较弱。矮生型四棱豆无性生殖显著高于攀援型, 其营养生长高于低于攀援型, 两者有性生殖均较弱。基于 ANP 的生活史型划分结果符合田间实际情况, 反映了攀援型和矮生型四棱豆生活史型特征。

2.5 基于 3 种方法的生活史型划分参数比较

PCA 和 AHP 均假定营养生长指标变量为独立变量, 生活史型划分参数计算时未考虑指标之间的相互关系。PCA 计算的 V 型参数值( $x$ ) 最低, 由营养生长指标变量计算结果偏低(图 7)。AHP 计算的 V 型参数值最高, 主要原因是其中间层的营养生长权重较大, 达到 0.712, 导致 V 型参数值偏高。ANP 计算 V 型参数值时考

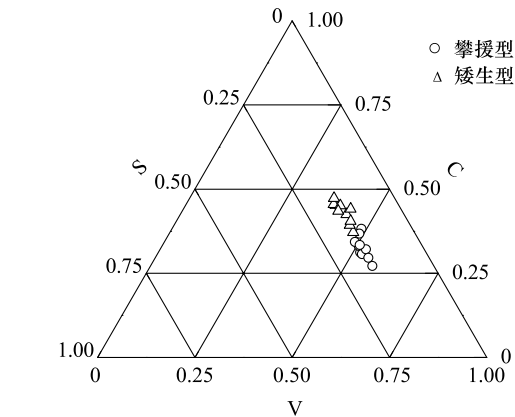


图 6 基于 ANP 的攀援型和矮生型四棱豆生活史型划分结果

Fig. 6 The classification results of life cycle form of *P. tetragonolobus* of climbing type and dwarf type based on ANP



虑了指标之间的相互影响,计算出的营养生长权重为 0.47,因而基于 ANP 的综合得分在 PCA 和 AHP 之间。ANP、PCA 和 AHP 法计算的攀援型四棱豆的 V 型参数值总体上均高于矮生型。

PCA 计算的攀援型四棱豆 C 型参数值( $y$ )最低,矮生型四棱豆 C 型参数值略高于 AHP,总体上两种的 C 型参数估测偏低。ANP 法的两种类型四棱豆的 C 型参数均高于 PCA 和 AHP 法(图 7),表明考虑指标之间的相互影响的无性生殖综合得分均较高,与藤本植物无性生殖较为发达的实际相符合。ANP、PCA 和 AHP 计算的攀援型四棱豆的 C 型参数值总体上均低于矮生型。

PCA 计算的攀援型和矮生型四棱豆 S 型参数值( $z$ )均最高,均在 0.42 以上,S 型参数估测偏高。AHP 的两种类型四棱豆的 S 型参数均低于 ANP(图 7),表明考虑指标之间的相互影响的综合得分被调高。PCA、ANP 和 AHP 计算的攀援型四棱豆的 S 型参数值总体上均高于矮生型。

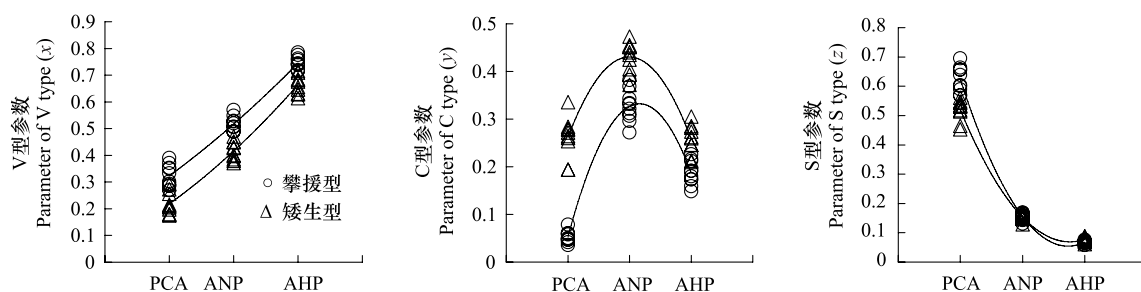


图 7 四棱豆生活史型划分参数比较

Fig. 7 Comparisons between classification parameters of life cycle form of *P. tetragonolobus*

总体看,PCA、ANP 和 AHP 对攀援型和矮生型四棱豆的生活史型划分参数估测趋势一致,即攀援型四棱豆的 V 型参数和 S 型参数均高于矮生型,C 型参数均低于矮生型。与 ANP 相比,PCA 计算的 V 型参数值( $x$ )和 C 型参数值( $y$ )偏低,S 型参数值( $z$ )偏高;AHP 计算的 V 型参数值( $x$ )偏高,C 型参数值( $y$ )和 S 型参数值( $z$ )偏低。三者生活史型划分参数差异表明性状指标之间的相关关系对生活史型定量划分结果产生了明显影响。

### 3 结论

基于 PCA 的植物生活史型划分方法的主要改进体现在以下 3 个方面:(1) 一些学者在生活史型划分参数计算时已注意到原始数据单位的影响问题<sup>[10]</sup>,因此生活史型划分的原始数据必须进行归一化处理;(2) 当存在 2 个以上主成分时,给出了主成分权重配置和计算综合得分的方法;(3) 以性状指标之间不存在显著的相关为 PCA 的适用条件。基于 PCA 的生活史型划分的计算过程简单,划分参数的区分度好,在性状指标之间相关不显著的情况下可以使用。由于四棱豆性状指标之间存在显著或极显著的相关性,得到的 V 型参数值( $x$ )偏低( $x$  在 0.390 以下),S 型参数值( $z$ )偏高( $z$  在 0.453 以上),甚至攀援型四棱豆的 V 型参数值( $x$ )比矮生型还低,与实际情况不符,因此基于 PCA 的四棱豆生活史型划分方法存在局限性。

植物的性状指标是人们根据植物生长发育特征分类、筛选的,对性状指标的重要性判断多基于植物生长发育特征进行定性排序。基于 AHP 的生活史型划分指标体系为 3 层的“分叉”结构,提供了中间层(即性状指标组)和指标层的权重分配办法。计算过程分为 4 个步骤:(1) 构建植物生活史型划分的 3 层“分叉”结构指标体系;(2) 参考性状指标的相关矩阵构建判断矩阵,计算中间层和指标层的权重向量;(3) 分别计算营养生长、无性生殖和有性生殖的综合得分;(4) 计算生活史型划分参数。由于 AHP 假定指标变量之间相互独立,尤其是中间层权重计算未考虑指标之间的显著相关,计算的营养生长变量  $V_v$  的权重过高(0.712),有性生殖  $S_s$  的权重过低(0.06),因此得到的 V 型参数值( $x$ )偏高( $x$  在 0.614 以上),S 型参数值( $z$ )偏低( $z$  在 0.088 以下),导致生活史型划分结果出现偏差。在性状指标之间存在显著相关关系的条件下,AHP 法也不适于植物生活史型的定量划分。

基于 ANP 的生活史型划分指标体系为“网状”结构,其中控制层和网络层的权重分配均考虑了指标之间

的关联。计算过程分为 4 个步骤:(1) 构建植物生活史型划分的 3 层“网状”结构指标体系;(2) 参考性状指标的相关矩阵构建判断矩阵,计算控制层和网络层的权重向量;(3) 分别计算营养生长、无性生殖和有性生殖的综合得分;(4) 计算生活史型划分参数。ANP 的指标体系考虑了指标变量之间关联,提取性状指标相关矩阵信息构建判断矩阵,控制层和网络层的权重分配合理,攀援型和矮生型四棱豆 V 型参数值( $\alpha$ )分别在 0.487—0.57 和 0.371—0.471 之间,C 型参数值( $\gamma$ )在 0.272—0.382 和 0.372—0.473 之间,S 型参数值( $z$ )分别在 0.131—0.169 和 0.129—0.166 之间。在性状指标之间相关显著的条件下,基于 ANP 的植物生活史型划分方法是进行植物生活史型定量化的有效方法。

基于 ANP 的生活史型划分方法,攀援型和矮生型四棱豆生活史型分别为  $V_{0.475} C_{0.262} S_{0.263}$  和  $V_{0.378} C_{0.365} S_{0.257}$ 。

## References:

- [1] Zu Y G, Wang W J, Yang F J, Yu J H, Cao J G, Zhao Z H. Dynamic analysis and diversity of plant Life cycle forms. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22 (11): 1811-1818.
- [2] Zu Y G, Zhao Z H, Yang F J, Tang Z H, Cao J G. Classification and reciprocal transformation of plant life cycle forms. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(9): 2347-2353.
- [3] Zhao Z H, Zu Y G, Tang Z H, Cao J G. The classify of the liquorice life cycle form. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(9): 2341-2346.
- [4] Zu Y G, Jia J, Wang W J, Yang F J, Chen H F, Zhang N J. Changes in several physiological-biochemical parameters during the life cycle of *Iva xanthifolia*. *Chinese Bulletin of Botany*, 2006, 23(4): 348-355.
- [5] Tang Z H, Yang L, Liang S N, Zu Y G. Effects of different water conditions on life cycle forms and physiological metabolisms of *Catharanthus roseus*. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7): 2742-2747.
- [6] Tang Z H, Guo X R, Zhang X K, Gao Y, Zu Y G, Yang L, Yang F J, Zhang Z H. The effects of harvest on transformation of plant life cycle forms of *Catharanthus roseus*. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(12): 4045-4049.
- [7] Wang W J, Li W X, Xu H N, Zu Y G, Wang Y. Characters of life cycle forms of *Chelidonium majus* populations in different habitats and their correlation to the contents of tannin, flavones and alkaloids in different organs. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11): 5228-5237.
- [8] Lin T, Xue X Z, Lu C Y. Methods for developing a net shape ecological indicator system and assigning rational weights to the indicators. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(1): 235-241.
- [9] Wang J, Li H. The studies on the application diversity of ANP. *Forecasting*, 2007, 26(6): 64-68.
- [10] Zu Y G, Wang Y, Wang W J, Hu Y, Wang X P, Sun W. The classification of life cycle form spectrum of artificial community of *Pinus sylvestris* var. *mongolica*. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7): 2695-2703.
- [11] Luo Z Q, Yang S L. Comparative Study on Several Scales in AHP. *Chinese Journal of Systems Engineering-Theory and Practice*, 2004, 24(9): 51-60.
- [12] Yan S H, Tian X. Method of comparison matrix consistency adjustment based on AHP. *Armament Automation*, 2008, 27(4): 8-9, 14-14.

## 参考文献:

- [1] 祖元刚,王文杰,杨逢建,于景华,曹建国,赵则海. 植物生活史型的多样性及动态分析. *生态学报*, 2002, 22(11): 1811-1818.
- [2] 祖元刚,赵则海,杨逢建,唐中华,曹建国. 植物生活史型的划分及其相互转化. *生态学报*, 2005, 25(9): 2347-2353.
- [3] 赵则海,祖元刚,唐中华,曹建国. 甘草生活史型的划分. *生态学报*, 2005, 25(9): 2341-2346.
- [4] 祖元刚,贾晶,王文杰,杨逢建,陈华峰,张乃静. 假苍耳的生活史进程中几种生理生化指标的变化. *植物学通报*, 2006, 23(4): 348-355.
- [5] 唐中华,杨蕾,梁胜楠,祖元刚. 土壤不同水分条件对长春花 (*Catharanthus roseus*) 生活史型的影响. *生态学报*, 2007, 27(7): 2743-2747.
- [6] 唐中华,郭晓瑞,张学科,高扬,祖元刚,杨蕾,杨逢建,张衷华. 刈割对栽培长春花 (*Catharanthus roseus*) 生活史型转变的影响. *生态学报*, 2006, 26(12): 4045-4049.
- [7] 王文杰,李文馨,许慧男,祖元刚,王宇. 不同生境白屈菜 (*Chelidonium majus*) 生活史型特征及其与不同器官单宁、黄酮、生物碱含量的关系. *生态学报*, 2008, 28(11): 5228-5237.
- [8] 吝涛,薛雄志,卢昌义. “网状”生态指标体系构建及其指标权重分配方法. *生态学报*, 2007, 27(1): 235-241.
- [9] 王娟,李华. 网络层次分析法应用形式的多样性. *预测*, 2007, 26(6): 64-68.
- [10] 祖元刚,王宇,王文杰,胡英,王晓鹏,孙伟. 樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) 人工群落生活史型谱. *生态学报*, 2007, 27(7): 2695-2703.
- [11] 骆正清,杨善林. 层次分析法中几种标度的比较. *系统工程理论与实践*, 2004, 24(9): 51-60.
- [12] 严世华,田效. 基于层次分析法的判断矩阵一致性调整方法. *武器装备自动化*, 2008, 27(4): 8-9, 14-14.

# 《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报  
(SHENGTAI XUEBAO)  
(半月刊 1981 年 3 月创刊)  
第 32 卷 第 16 期 (2012 年 8 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA  
(Semimonthly, Started in 1981)  
Vol. 32 No. 16 (August, 2012)

|               |                                                                                                                    |                 |                                                                                                                                                                                 |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 编 辑           | 《生态学报》编辑部<br>地址:北京海淀区双清路 18 号<br>邮政编码:100085<br>电话:(010)62941099<br>www.ecologica.cn<br>shengtaixuebao@rcees.ac.cn | Edited by       | Editorial board of<br>ACTA ECOLOGICA SINICA<br>Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China<br>Tel:(010)62941099<br>www.ecologica.cn<br>Shengtaixuebao@rcees.ac.cn |
| 主 编           | 冯宗炜                                                                                                                | Editor-in-chief | FENG Zong-Wei                                                                                                                                                                   |
| 主 管           | 中国科学技术协会                                                                                                           | Supervised by   | China Association for Science and Technology                                                                                                                                    |
| 主 办           | 中国生态学学会<br>中国科学院生态环境研究中心<br>地址:北京海淀区双清路 18 号<br>邮政编码:100085                                                        | Sponsored by    | Ecological Society of China<br>Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS<br>Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China                                 |
| 出 版           | 科 学 出 版 社<br>地址:北京东黄城根北街 16 号<br>邮政编码:1000717                                                                      | Published by    | Science Press<br>Add:16 Donghuangchenggen North Street,<br>Beijing 1000717, China                                                                                               |
| 印 刷           | 北京北林印刷厂                                                                                                            | Printed by      | Beijing Bei Lin Printing House,<br>Beijing 100083, China                                                                                                                        |
| 发 行           | 科 学 出 版 社<br>地址:东黄城根北街 16 号<br>邮政编码:1000717<br>电话:(010)64034563<br>E-mail:journal@cspg.net                         | Distributed by  | Science Press<br>Add:16 Donghuangchenggen North<br>Street, Beijing 1000717, China<br>Tel:(010)64034563<br>E-mail:journal@cspg.net                                               |
| 订 购           | 全国各地邮局                                                                                                             | Domestic        | All Local Post Offices in China                                                                                                                                                 |
| 国外发行          | 中国国际图书贸易总公司<br>地址:北京 399 信箱<br>邮政编码:100044                                                                         | Foreign         | China International Book Trading<br>Corporation<br>Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China                                                                                      |
| 广告经营<br>许 可 证 | 京海工商广字第 8013 号                                                                                                     |                 |                                                                                                                                                                                 |



ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元