

DOI: 10.5846/stxb201907311623

周俊妞, 黄婧, 马姜明, 莫燕华, 王海苗. 桂林喀斯特石山 50 种常见植物叶片养分特征及其适应性差异. 生态学报, 2020, 40(17): 6126-6134.

Zhou J N, Huang J, Ma J M, Mo Y H, Wang H M. Leaf nutrient characteristics and adaptability of 50 common plant species in the karst rocky mountains of Guilin. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(17): 6126-6134.

桂林喀斯特石山 50 种常见植物叶片养分特征及其适应性差异

周俊妞^{1,2}, 黄婧^{1,2}, 马姜明^{1,2,3,*}, 莫燕华^{1,2}, 王海苗^{1,2}

1 珍稀濒危动植物生态与环境保护教育部重点实验室, 桂林 541006

2 广西师范大学生命科学学院, 桂林 541006

3 广西珍稀濒危动物生态学重点实验室, 桂林 541006

摘要:选取漓江流域岩溶石山 50 种常见植物为研究对象, 分别测定叶片中碳(C)、氮(N)、磷(P)、钾(K)及钙(Ca)含量。利用多元统计方法分析叶片养分组成特征, 探讨不同生长型植物对岩溶石山生境的适应性差异, 旨在为岩溶石山地区的植被恢复建设提供理论依据。方差分析表明, 50 种常见植物叶片中 C_{mass} 、 N_{mass} 、 P_{mass} 、 K_{mass} 、 Ca_{mass} 、C/N、C/P 和 N/P 等 8 个养分指标均存在显著差异, 叶片中 C、Ca 含量较高, N、P 含量较低, 植物生长主要受 P 限制。相关性分析表明, C% 与 N% 和 C/N 呈极显著相关, 与 K% 和 Ca% 呈显著相关; N% 与 C/N、C/P、P% 和 K% 极显著相关; P% 与 K%、C/N 和 N/P 呈极显著相关, 与 C/P 呈显著相关; K% 和 C/N 呈极显著相关; C/N、N/P 与 C/P 均呈极显著相关; 其他指标之间的相关性不显著。基于叶片养分聚类分析表明, 所研究的 50 种植物可划分为三类, 即喜钙植物、高生产力植物和高抗旱植物。研究结果可为该石漠化地区植被的重建与恢复提供一定的参考依据。

关键词:桂林喀斯特石山; 叶片养分; 相关性分析; 聚类分析

Leaf nutrient characteristics and adaptability of 50 common plant species in the karst rocky mountains of Guilin

ZHOU Junniu^{1,2}, HUANG Jing^{1,2}, MA Jiangming^{1,2,3,*}, MO Yanhua^{1,2}, WANG Haimiao^{1,2}

1 Key Laboratory of Rare and Endangered Animal and Plant Ecology and Environmental Protection, Ministry of Education, Guilin 541006, China

2 College of Life Science, Guangxi Normal University, Guilin 541006, China

3 Guangxi Key Laboratory of Rare and Endangered Animal Ecology, Ministry of Education, Guilin 541006, China

Abstract: In this study, 50 common plant species in the karst rocky mountains of Guilin were selected, and contents of carbon (C), nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K) and calcium (Ca) in leaves were measured. Multivariate analysis was adopted to characterize the nutrient compositions of the selected plants in order to explore their adaptability to the habitat of karst rocky mountains aiming to provide guidance for vegetation restoration in the karst areas. Variance analyses showed that there were significant differences among the selected plant species in terms of the indices of nutrient contents, including C_{mass} , N_{mass} , P_{mass} , K_{mass} , Ca_{mass} , C/N, C/P and N/P in the leaves. The contents were highest for C and Ca, intermediate for N and P, indicating that growth of these plant species were mainly limited by P. The correlation analyses revealed that C% was extremely significantly ($P < 0.01$) correlated with N% and C/N, and was significantly ($P < 0.05$) correlated with K% and Ca%. N% was extremely significantly correlated with C/N, C/P, P% and K%. P% was

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31160156, 31660197)

收稿日期: 2019-07-31; 网络出版日期: 2020-07-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mjming03@163.com

extremely significantly correlated with K%, C/N and N/P, and was significantly correlated with C/P. The correlation between K% and C/N was extremely significant. C/N, N/P and C/P were extremely significantly correlated. The correlations of other indices were not significant. Cluster analyses based on leaf nutrients indicated that the selected plant species could be divided into three different adaptive types, i.e., calcium-loving plants, highly productive plants, and drought-resistant plants. Our results provide useful implications for the reconstruction and restoration of vegetation in the karst areas.

Key Words: karst rocky mountain in Guilin; leaf nutrient; correlation analysis; cluster analysis

作为植物的基本营养元素,C、N、P、K 在植物生长、发育过程中发挥着重要作用,且彼此关系密切。叶片是植物进行光合作用和蒸腾作用的重要场所,叶片养分含量能够在一定程度上反映植物的生长状况^[1],是植物的一个相对稳定的结构参数和功能参数^[2]。C、N、P、K 作为植物生长发育所必需的营养元素,在植物体构成和生理代谢方面发挥着重要作用。生态化学计量学表明,C/N 和 C/P 指 C 与养分的比值关系,是表示养分利用效率的指标,而 N/P 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^[3-6]。本文的研究对象为喀斯特石山常见植物,因此增加了植物叶片 Ca 含量的分析,作为植物适应喀斯特石山的重要指标。目前,有关植物叶性状的研究主要有:叶片养分生态化学计量学^[7]的研究,叶片养分与环境因子的关系^[8-9],养分添加对植物叶片养分的影响^[10-11],叶片养分与产量的相关性研究^[12],叶片养分组成空间分布格局^[13],等。喀斯特地区植物叶性状的研究主要集中在化学计量学^[14-15]的研究,而对植物叶片养分特征的研究及植物适应性分类的研究未见报道。

桂林喀斯特石山地处漓江流域典型岩溶区,地貌上由碳酸盐岩溶蚀为主形成的峰丛洼(谷)地、峰林平原为主的典型岩溶地貌区,岩溶发育强烈、景观类型复杂,生态系统极为脆弱^[16-17]。近年来,由于人为活动干扰剧烈以及自然干扰频繁,导致石漠化严重,植被植物生长缓慢,形成了不同植被退化阶段共存的局面^[18]。本文选取桂林喀斯特石山 50 种常见植物为研究对象,利用多元统计方法从叶片养分含量角度分析,探讨不同植物对喀斯特石山生境的适应性差异,为加快植被恢复演替进程提供一定的理论依据。

1 研究区概况

研究区地处广西壮族自治区东北部桂林市岩溶石山,109°36′—111°29′ E,24°15′—26°23′ N。属于山地丘陵地区,为典型的“喀斯特”岩溶地貌,气候属于中亚热带湿润季风气候,气候温和,雨量充沛。年平均气温 18.9℃,年平均日照时数 1670 h。最冷的 1 月份平均气温 15.6℃,最热的 8 月份平均气温 23℃,全年无霜期 300 d,年平均降雨量为 1949.5 mm,降雨量年分配不均,秋、冬季干燥少雨,年平均蒸发量为 1490—1905 mm。

本实验选取桂林市内 8 个 50 种常见参试植物的典型分布点,样点分布图如图 1 所示。选取群落内部物种组成、群落结构和生境相对均匀,且人为干扰较少的研究地作为采样点,各样点之间距离最远不超过 9 km,8 个采样点土壤养分均无显著差异。由于参试物种较多,不能保证每个采样点均存在 50 种参试植物,因此本试验中 50 种常见参试植物的叶片养分含量为 8 个样地叶片养分的平均值。

2 研究材料与方法

2.1 实验材料

在研究样地上随机选取长势良好的样株,每个物种 3 株,受试植物叶片均采集成熟的营养叶片。并在每株植株中部位置的东南西北 4 个方向分别剪下着生叶片的小枝条,每株的东南西北叶片混合一个样,装入保鲜袋中,带回实验室。

2.2 研究方法

实验叶片用蒸馏水迅速冲洗干净,剪去叶柄,放入烘箱中杀青,75℃烘干至恒重,称量干重,用粉碎机粉碎

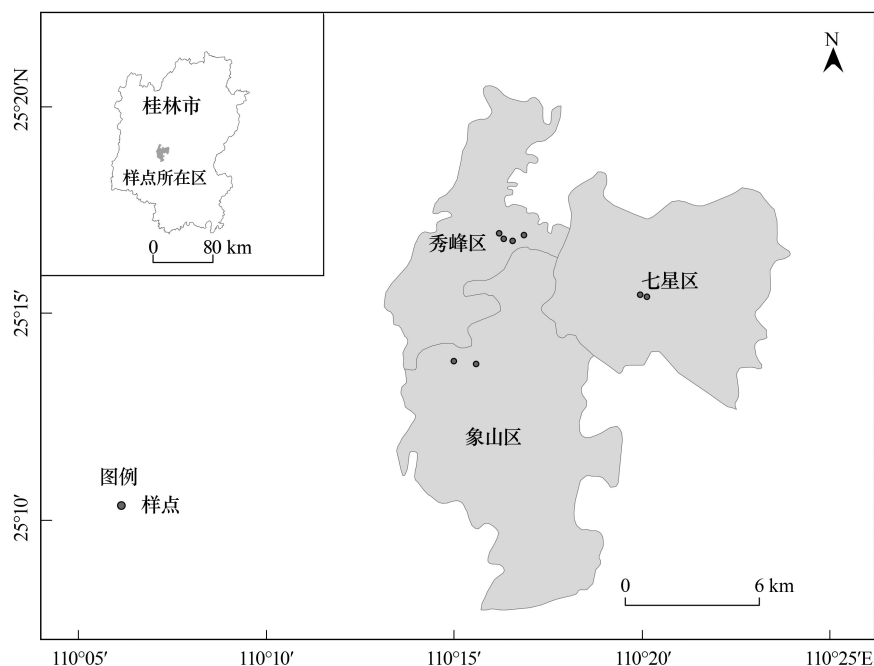


图1 采样点分布图

Fig.1 Sampling distribution

后过 60 目的筛(孔直径为 0.25 mm),用于叶片养分含量的测定。叶片养分 C、N 用全自动元素分析仪测定, P 的测定采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮—钼锑抗比色法^[19]; K 和 Ca 经 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 消煮,用原子吸收分光光度法(Aanlyst 800)测定,每个样品重复 3 次测定。

2.3 数据处理

采用 SPSS 21.0 软件处理叶片养分指标的基本描述统计量; Duncan 多重比较、Pearson 相关分析和聚类分析,用 Excel 2010 数据处理软件绘制图表。

3 结果与分析

3.1 叶片养分组成分析

由表 1 可知,桂林喀斯特生境 50 种常见植物叶片 C_{mass} 含量在 $(443.15 \pm 5.02) - (635.91 \pm 2.60)$ mg/g, 平均值为 523.73 mg/g, 密花树 (*Myrsine seguinii*) 叶片 C_{mass} 含量显著大于其他 49 种植物, 紫弹树 (*Celtis biondii*) 叶片 C_{mass} 含量显著小于其他 49 种物种; 叶片 N_{mass} 含量在 $(8.87 \pm 0.17) - (33.42 \pm 1.21)$ mg/g, 平均值为 16.76 mg/g, 疏叶崖豆 (*Millettia pulchra* var. *laxior*) 叶片 N_{mass} 含量显著大于其他 49 种植物, 青江藤 (*Celastrus hindsii*) 叶片 N_{mass} 含量显著小于其他 49 种物种; 叶片 P_{mass} 含量在 $(0.28 \pm 0.01) - (2.12 \pm 0.02)$ mg/g, 平均值为 0.97 mg/g, 小花扁担杆 (*Grewia biloba* var. *parviflora*) 叶片 P_{mass} 含量显著大于其他 49 种植物, 亮叶素馨 (*Jasminum seguinii*) 叶片 P_{mass} 含量显著小于其他 49 种物种; 叶片 K_{mass} 含量在 $(4.48 \pm 0.09) - (20.57 \pm 0.24)$ mg/g, 平均值为 9.46 mg/g, 扁片海桐 (*Pittosporum planilobum*) 叶片 K_{mass} 含量显著大小其他 49 种植物, 龙须藤 (*Bauhinia championii*) 叶片 K_{mass} 含量显著大于其他 49 种物种; 叶片 Ca_{mass} 含量在 $(5.23 \pm 0.07) - (71.11 \pm 0.381)$ mg/g, 平均值为 24.81 mg/g, 细梗女贞 (*Ligustrum tenuipes*) 叶片 Ca_{mass} 含量显著大于其他 49 种植物, 青江藤 (*Celastrus hindsii*) 叶片 Ca_{mass} 含量显著小于其他 49 种物种; 叶片 C/N 含量在 $(14.95 \pm 0.62) - (69.66 \pm 3.74)$, 平均值为 35.46, 密花树 (*Myrsine seguinii*) 叶片 C/N 含量显著大于其他 49 种植物, 疏叶崖豆 (*Millettia pulchra* var. *laxior*) 叶片 C/N 含量显著小于其他 49 种物种; 叶片 C/P 含量在 $(237.42 \pm 2.22) - (2088.65 \pm$

表 1 50 种植物叶片养分含量的 Duncan 多重比较
Table 1 Post hoc Duncan test on leaf nutrient contents among 50 plant species

物种 Plant species	C _{miss} / (mg/g)	N _{miss} / (mg/g)	P _{miss} / (mg/g)	K _{miss} / (mg/g)	Ca _{miss} / (mg/g)	C/N	C/P	N/P
火棘 <i>Pyracantha fortuneana</i>	604.94±0.53rs	15.64±0.02klmno	1.47±0.02r	10.47±0.22no	11.56±0.11de	38.67±0.05nopqr	412.08±4.36de	10.66±0.10abcd
蔓胡颓子 <i>Elaeagnus glabra</i>	588.87±14.43qr	22.35±0.35tuv	1.02±0.01o	5.47±0.07abcde	15.03±0.63kl	26.37±1.00efghi	584.21±14.52ghij	22.17±0.32lmnopq
紫薇 <i>Lagerstroemia indica</i>	496.92±1.02cdefgh	12.88±0.01defgh	1.31±0.01q	9.62±0.32lmn	16.59±0.28n	38.56±0.10nopqr	378.22±2.87bcde	9.81±0.09abc
矮小天仙果 <i>Ficus erecta</i>	463.20±0.24abc	23.38±0.74vw	1.68±0.03st	14.68±1.93qr	39.72±0.70B	19.85±0.62abcde	275.33±4.73ab	13.88±0.24bcdefg
齿叶黄皮 <i>Clausena dunniana</i>	495.92±11.76cdefgh	19.41±0.07qrs	0.76±0.01hij	11.03±0.08o	40.85±0.45C	25.56±0.52defghi	649.85±22.32ijkl	25.42±0.35opqr
了哥王 <i>Wikstroemia indica</i>	483.23±8.78bcdefg	10.91±0.53abcd	1.64±0.02st	6.94±0.01hijk	26.48±0.22w	44.40±1.35rstuv	294.91±2.54abc	6.65±0.25a
小叶女贞 <i>Ligustrum quihoui</i>	547.58±9.01klmnop	17.24±0.61mnop	1.14±0.01p	5.72±0.45cdefg	15.18±0.34kl	31.81±0.58ijklmn	480.83±9.07efg	15.13±0.56cdefghi
小花扁担杆 <i>Grewia biloba</i> var. <i>parviflora</i>	502.63±1.24efghi	27.80±0.25y	2.12±0.02v	14.57±0.18q	30.69±0.29z	18.08±0.12abc	237.42±2.22a	13.14±0.21bcdefg
红背山麻杆 <i>Alchornea trevioides</i>	505.99±1.45fghij	19.68±0.77rs	1.29±0.01q	9.84±0.14mn	17.36±0.23o	25.79±1.08efghi	391.56±1.71cde	15.24±0.70defghi
皱果鸡血藤 <i>Callerya oosperma</i>	528.80±2.44hijklmno	17.09±0.84lmnop	0.85±0.01jkl	5.62±0.18bcdef	20.27±0.08s	31.11±1.68ijklm	619.30±7.21hijk	20.00±0.85hijklmn
白皮乌口树 <i>Tarenna depauperata</i>	568.79±11.57pq	11.1±0.02abcde	0.39±0.01b	9.61±0.20lmn	18.38±0.19pq	51.21±1.15vwxy	1461.89±45.05r	28.53±0.30r
黄荆 <i>Vitex negundo</i>	590.72±0.27qr	17.52±0.08opq	1.32±0.01q	5.43±0.06abcde	16.4±0.03mn	33.72±0.15klmno	448.79±2.62ef	13.31±0.02bcdefg
石岩枫 <i>Mallotus repandus</i>	560.1±14.83nopq	19.72±0.35rs	1.27±0.04q	16.29±0.29stu	54.7±0.53G	28.40±0.29ghijkl	442.21±25.40ef	15.56±0.76defghij
斜叶榕 <i>Ficus tinctoria</i> subsp. <i>gibbosa</i>	467.12±12.98abcd	14.00±0.48fghijk	1.48±0.02r	11.32±0.22o	65.41±0.16H	33.51±2.03jklmn	315.91±12.26abcd	9.45±0.22ab
密花树 <i>Myrsine seguinii</i>	635.91±2.60s	9.18±0.53a	1.01±0.03o	4.60±0.04ab	19.08±0.05qr	69.66±3.74A	629.11±13.89hijkl	9.06±0.32ab
子楝树 <i>Decaspermum gracilentum</i>	534.33±11.87ijklmnop	13.09±0.04efghi	0.38±0.01b	7.15±0.02jik	13.37±0.07ghi	40.83±0.80opqrs	1391.54±48.67r	34.06±0.56st
亮叶素馨 <i>Jasminum seguinii</i>	504.96±1.08fghi	10.77±0.85abcd	0.28±0.01a	16.79±0.03uv	16.21±0.03mn	47.52±3.84stuvw	1785.57±89.80s	37.77±1.35tcv
白马骨 <i>Serissa serissoides</i>	526.98±4.73hijklmn	22.04±0.08tuv	1.73±0.01t	16.52±0.13tuv	22.68±0.28t	23.91±0.13cdefgh	304.31±1.61abcd	12.73±0.02bcdef
麻叶绣线菊 <i>Spiraea cantoniensis</i>	513.88±3.09ghijk	24.95±0.03wx	1.67±0.02st	16.25±0.17stu	14.72±0.05jk	20.59±0.11abcde	307.18±5.69abcd	14.92±0.20cdefgh
竹叶花椒 <i>Zanthoxylum armatum</i>	457.35±0.62ab	15.19±0.26ijklm	1.16±0.02p	6.93±0.02hijk	65.62±0.05H	30.12±0.47hijklm	394.13±5.98cde	13.09±0.06bcdefg
一叶萩 <i>Flueggea suffruticosa</i>	517.93±0.61ghijkl	33.29±0.64z	2.04±0.01v	17.33±0.11v	16.48±0.07n	15.57±0.32ab	253.46±1.87a	16.29±0.29efghijk
钩齿鼠李 <i>Rhamnus lamprophylla</i>	504.17±4.04fghi	19.08±0.58pqrs	0.54±0.01cdefg	12.57±0.13p	13.34±0.19ghi	26.45±0.59efghij	936.75±22.18o	35.47±1.48t
马甲子 <i>Paliurus ramosissimus</i>	471.68±9.81abcde	25.62±0.01x	0.70±0.04h	13.47±0.03p	13.56±0.14hi	18.41±0.39abcd	681.60±49.46ijkl	36.95±1.92tc
细梗女贞 <i>Ligustrum tenuipes</i>	615.77±1.78rs	10.01±0.01ab	0.45±0.01bc	6.34±0.04efghi	5.23±0.07a	61.54±0.17zz	1395.26±2.76r	22.67±0.07mnopq
铁榄 <i>Sinosideroxylon pedunculatum</i>	608.76±3.60rs	13.14±0.63efghi	0.53±0.07cdefg	6.15±0.21defghi	12.38±0.19f	46.58±2.54stuvw	1192.68±166.62q	25.88±4.40pqr
广西鼠李 <i>Rhamnus kwangsiensis</i>	545.82±11.77klmnop	13.27±0.13fghij	0.50±0.01cdef	5.42±0.03abcde	51.77±0.03F	41.14±1.18pqrs	1098.77±17.11pq	26.76±0.26qr
欒木 <i>Loropetalum chinense</i>	570.61±17.49jklmnop	12.9±0.04hijkl	1.06±0.02lmo	5.40±0.22cdef	28.14±0.31x	44.25±1.49nopqr	541.30±27.39hij	12.22±0.22ghijklm
薄叶鼠李 <i>Rhamnus leptophylla</i>	468.54±14.48abcde	23.92±0.55vwxy	0.59±0.01efg	12.59±0.21p	15.64±0.12lm	19.64±1.04abcde	806.73±21.63mn	41.21±1.16cv
青冈 <i>Cyclobalanopsis glauca</i>	523.68±1.34hijklm	11.93±0.02bcdef	0.89±0.02klm	6.12±0.06defghi	11.94±0.01ef	43.89±0.07rstu	588.76±10.39hij	13.43±0.20bcdefg
化香树 <i>Platycarya strobilacea</i>	495.70±3.74cdefgh	18.22±0.36pqr	1.62±0.02s	6.55±0.03fghij	13.23±0.03gh	27.22±0.34fghijk	306.74±5.57abcd	11.28±0.33abcde
刺叶冬青 <i>Ilex bitorisensis</i>	514.85±1.83ghijk	9.77±0.26ab	0.60±0.02g	5.51±0.20abcde	18.22±0.05p	52.79±1.45wxy	859.56±25.55no	16.30±0.05efghijk

续表

物种 Plant species	C _{mass} / (mg/g)	N _{mass} / (mg/g)	P _{mass} / (mg/g)	K _{mass} / (mg/g)	Ca _{mass} / (mg/g)	C/N	C/P	N/P
阴香 <i>Cinnamomum burmannii</i>	517.91±0.65ghijkl	15.20±0.23ijklm	1.32±0.03q	8.94±0.02lm	24.26±0.19u	34.08±0.47klmnop	393.64±7.44cde	11.54±0.06abcde
木犀 <i>Osmanthus fragrans</i>	551.50±15.78lmnop	9.73±0.31ab	0.77±0.02hij	5.95±0.02defgh	14.14±0.02ij	56.88±3.50xyzz	719.19±5.05klm	12.71±0.67bcdef
光皮棘木 <i>Cornus wilsoniana</i>	504.57±3.02fghi	14.65±0.09ghijk	0.96±0.01mo	7.55±0.02jk	49.01±0.06E	34.44±0.04klmnop	527.46±5.01fgh	15.33±0.18defghij
南岭柞木 <i>Xylosma controversa</i>	493.35±6.23cdefgh	9.79±0.27ab	0.46±0.01bcd	7.14±0.06ijk	48.58±0.39E	50.51±2.07uvw	1081.67±34.88p	21.51±0.15klmnop
菜豆树 <i>Radermachera sinica</i>	470.68±13.81abcdef	21.22±0.50stu	1.87±0.02u	15.43±0.13qrs	12.73±0.06fg	22.24±1.16bcdefg	252.32±9.60a	11.36±0.16abcde
紫弹树 <i>Celtis biondii</i>	443.15±5.02a	22.18±0.53uv	0.60±0.01fg	6.69±0.09ghijk	26.66±0.04w	20.01±0.63abcde	746.91±8.95lm	37.27±0.65tcv
铜钱树 <i>Paliurus hemsleyanus</i>	478.34±8.67bcdef	22.98±1.31uvw	0.77±0.01hij	10.57±0.12no	11.06±0.36d	20.99±1.50abcdef	618.50±2.88hijk	29.78±2.24rs
扁片海桐 <i>Pittosporum planilobum</i>	546.18±23.22klmnop	12.65±0.23cdefg	0.52±0.01cdefg	20.57±0.24w	7.58±0.02c	43.25±2.30rst	1078.25±48.10p	24.99±0.24nopqr
柱果铁线莲 <i>Clematis uncinata</i>	545.16±4.51klmnop	10.67±1.28abc	0.53±0.01cdefg	5.83±0.03defg	43.05±0.58D	52.76±7.03wxy	1035.09±2.51p	20.32±2.52ijklmno
山木通 <i>Clematis finetiana</i>	515.07±10.11ghijk	14.88±0.02ghijk	0.25±0.01a	7.65±0.22k	36.61±0.34A	34.62±0.64lmnop	2088.65±44.06t	60.32±0.46w
青江藤 <i>Celastrus hindsi</i>	521.28±11.77hijklm	8.87±0.17a	0.49±0.01cde	15.58±0.32rst	71.11±0.38I	58.79±1.81yzz	1078.32±18.19p	18.32±0.49ghijklm
络石 <i>Trachelospermum jasminoides</i>	477.79±1.89bcdef	20.44±0.01 st	0.55±0.01defg	12.80±0.02p	29.07±0.01y	23.37±0.10cdefgh	868.97±12.54no	36.99±0.32tc
灰毛鸡血藤 <i>Callerya chinerea</i>	541.75±0.89klmnop	17.43±0.55nopq	0.95±0.01mo	8.70±0.08l	12.44±0.03f	31.14±1.00ijklm	570.41±6.04ghi	18.41±0.80ghijklm
无柄五层龙 <i>Salacia sessiliflora</i>	500.00±0.79defghi	14.00±0.54ghijk	0.70±0.02h	4.70±0.01abc	24.60±0.17uv	35.83±1.36mnopq	715.01±16.42klm	20.01±1.08hijklmn
小果蔷薇 <i>Rosa cymosa</i>	562.54±6.67opq	13.43±1.18fghijk	0.79±0.01hij	7.67±0.02k	19.53±0.08rs	42.67±4.53qrst	715.08±0.64klm	17.06±1.66fghijkl
吊山桃 <i>Secamone sinica</i>	529.23±0.09hijklmno	10.72±0.30abcd	0.82±0.01ijk	5.21±0.02abcd	22.93±0.02t	49.46±1.39tuvw	648.12±5.13jkl	13.14±0.39bcdefg
疏叶崖豆 <i>Milletia pulchra</i> var. <i>laxior</i>	497.98±2.24cdefgh	33.42±1.21z	0.79±0.01hij	9.81±0.05mn	6.09±0.07b	14.95±0.62a	630.39±2.54hijkl	42.50±1.80v
龙须藤 <i>Bauhinia championii</i>	518.67±3.12ghijkl	15.33±0.66ijklmn	0.75±0.01hi	4.48±0.09a	25.24±0.27v	33.98±1.66klmnop	697.82±7.01klm	20.64±0.77ijklmno
皱叶雀梅藤 <i>Sageretia rugosa</i>	555.37±11.34mnop	15.49±0.49jklmno	0.88±0.01klm	5.55±0.02bcdef	15.66±0.07lm	35.96±1.83mnopq	628.61±4.34hijkl	17.59±0.84fghijklm
方差分析 one-way	F = 26.53, P = 0.00	F = 125.96, P = 0.00	F = 698.44, P = 0.00	F = 185.72, P = 0.00	F = 4127.69, P = 0.00	F = 51.09, P = 0.00	F = 152.04, P = 0.00	F = 111.15, P = 0.00
ANOVA	同一列不同字母表示差异显著 (P < 0.05)							

44.06), 平均值为 711.21, 山木通 (*Clematis finetiana*) 叶片 C/P 含量显著大于其他 49 种植物, 小花扁担杆 (*Grewia biloba* var. *parviflora*) 叶片 C/P 含量显著小于其他 49 种植物; 叶片 N/P 含量在 (6.65 ± 0.25) — (60.32 ± 0.46) , 平均值为 20.98, 山木通 (*Clematis finetiana*) 叶片 N/P 含量显著大于其他 49 种植物, 了哥王 (*Wikstroemia indica*) 叶片 N/P 含量显著小于其他 49 种植物。方差分析表明, 50 种常见植物叶片单位面积养分的 8 个指标均存在极显著差异。

3.2 叶片养分相关性分析

喀斯特石山生境 50 种常见植物叶片 C、N、P 等 8 种养分指标之间存在一定的相关性。如表 2 可知, 叶片 C% 与 N% 呈极显著的负相关, 与 C/N 呈极显著正相关, 与 K% 和 Ca% 呈显著负相关, 表明叶片 C/N 比值随着 C 含量的增加而增加, N、K、Ca 含量随着 C 含量的增加而减少; 叶片 N% 与 P% 和 K% 呈极显著正相关, 与 C/N 和 N/P 极显著负相关, 表明叶片 P、K 含量随着 N 含量增加而增加, C/N、N/P 比值随着 N 含量的增加而减少; 叶片 P% 与 C/N 和 N/P 呈极显著负相关, 与 K% 呈极显著正相关, 与 C/P 呈负相关, 表明叶片 K 含量随着 P 含量的增加而增加, C/N、N/P、C/P 比值随着 P 含量的增加而减少; 叶片 K% 和 C/N 呈极显著负相关, 表明 C/N 比值随着 K 含量的增加而减少; 叶片 C/N、N/P 与 C/P 均呈极显著正相关, 表明叶片 C/N、N/P 与 C/P 的比值随着 K 含量的增加而增加。

表 2 50 种植物叶片养分指标之间的 Pearson 相关系数
Table 2 Person correlation of indicators of leaf nutrient among 50 plants species

叶片养分指标 Indicators of Leaf nutrient	C%	N%	P%	K%	Ca%	C/N	C/P
N%	-0.372 **						
P%	-0.140	0.466 **					
K%	-0.307 *	0.451 **	0.293 **				
Ca%	-0.282 *	-0.207	-0.002	0.043			
C/N	0.574 **	-0.903 **	-0.449 **	-0.403 **	0.087		
C/P	0.210	-0.435 **	-0.840 *	-0.092	-0.012	0.461 **	
N/P	-0.208	0.222	-0.663 **	0.109	-0.123	-0.216	0.713 **

* : $P < 0.05$; ** : $P < 0.01$

3.3 聚类分析

采用离差平方和法进行聚类分析, 如图 2, 认为将 50 种植物分为 3 种类型较为合适。第一类(30 种): 火棘、蔓胡颓子、紫薇、齿叶黄皮、了哥王、小叶女贞、红背山麻杆、皱果鸡血藤、黄荆、石岩枫、斜叶榕、密花树、竹叶花椒、广西鼠李、榿木、青冈、化香树、刺叶冬青、阴香、木犀、光皮楝木、南岭柞木、柱果铁线莲、青江藤、灰毛鸡血藤、无柄五层龙、小果蔷薇、吊山桃、龙须藤、皱叶雀梅藤。第二类(7 种): 白皮乌口树、子楝树、亮叶素馨、细梗女贞、铁榄、扁片海桐、山木通。第三类(13 种): 矮小天仙果、小花扁担杆、白马骨、麻叶绣线菊、一叶萩、钩齿鼠李、薄叶鼠李、菜豆树、紫弹树、铜钱树、络石。

8 种叶片养分指标 C、N、P、K、Ca、C/N、C/P 和 N/P 中, 第一类植物的平均值分别为: 531.848 mg/g、14.408 mg/g、0.994 mg/g、7.518 mg/g、29.279 mg/g、39.449、608.221 和 15.737, 第二类植物的平均值分别为: 556.266 mg/g、12.233 mg/g、0.400 mg/g、10.610 mg/g、15.680 mg/g、46.506、1484.835 和 33.461, 第三类植物的平均值分别为: 487.459 mg/g、24.641 mg/g、1.204 mg/g、13.330 mg/g、19.418 mg/g、20.312、532.297 和 26.344。第一类植物叶片 Ca 含量平均值大于第二类植物和第三类植物, 表明第一类植物与第二类植物和第三类植物相比, 对高钙环境更具适应性; 第二类植物叶片 C、C/N、C/P 和 N/P 平均值均大于第一类植物和第三类植物, 植物叶片 C 含量和 C/N、C/P 比值在一定程度上可以反映植物生产力的大小, 表明第二类植物与第一类植物和第三类植物相比, 具有更高生产力; 第三类植物叶片 N、P、K 平均值均大于第一类植物和第三类植物, 植物叶片 K 含量越高, 抗旱性越强, 表明第三类植物与第一类植物和第三类植物相比, 更具抗旱性。

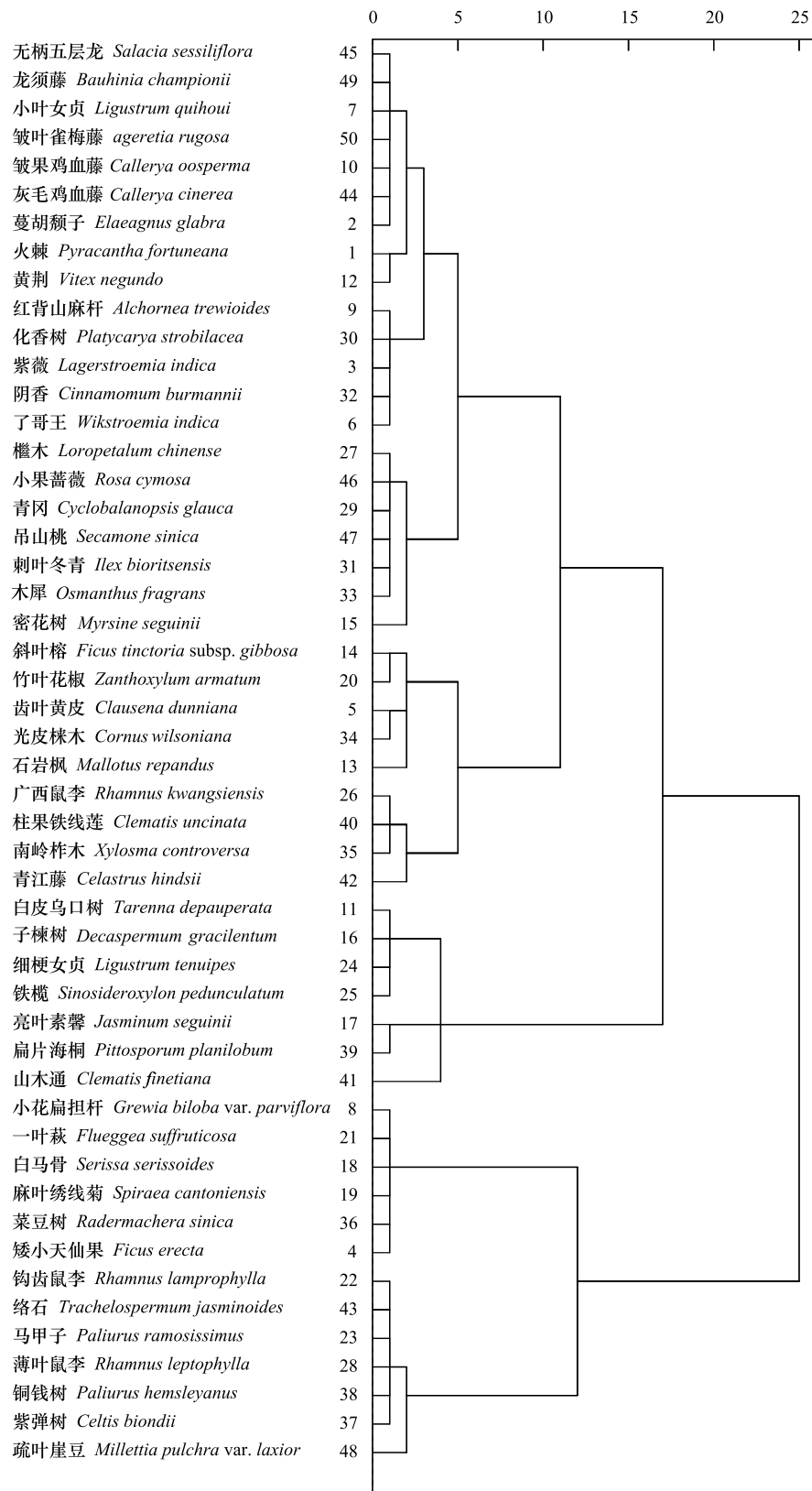


图2 50种植物的聚类分析结果

Fig.2 Cluster analysis results of 50 species of plants

4 讨论与结论

4.1 叶片组成养分分析

植物叶片的养分含量反映了植物在一定生境下吸收和贮存矿质的能力,在一定程度上也反映了植物生长的生境条件^[20]。漓江流域岩溶石山 50 种常见植物叶片中 C_{mass} 平均值为 523.73 mg/g, 均大于全球尺度 461.60 mg/g^[21], 表明岩溶石山土壤有机质含量较高, 植物具有较强的碳蓄积能力。 Ca_{mass} 平均值为 24.81 mg/g, 大于全国尺度 8.81 mg/g^[22], 远远高于陆地植物叶片 Ca 含量 2.3—5 mg/g 的正常范围, 可见漓江流域岩溶石山地区植被具有明显的高钙特征, 不同物种之间叶片 Ca 的差异较大, 这可能是由于不同物种对元素的选择吸收能力的差异所致。 K_{mass} 平均值为 9.46 mg/g, 小于全国尺度 10.30 mg/g^[22], 由于喀斯特地貌特征的原因, 雨水下渗严重, 土壤保水力差, 容易造成季节性的干旱, 这与 Rivas-Ubach 等^[23]认为 K 在干旱胁迫中具有重要地位的观点一致。干旱胁迫下可能会造成植物对 K 的依赖性增高, 漓江流域岩溶石山受水分胁迫更为严重, 导致 K 在该地区植物生理代谢中的作用更为明显。 N_{mass} 平均值为 16.76 mg/g, 小于全国尺度 20.50 mg/g^[22] 和全球尺度 20.1 mg/g^[21], 这可能与该地区的降水量有关。植物吸收的是移动性很强的有效氮(如硝态氮和氨态氮), 而漓江流域相对较多的降水量, 可能使这些移动性很强的氮发生淋溶, 故植物可吸收利用的有效氮减少, 导致漓江流域石山常见植物叶片 N_{mass} 含量较低。 P_{mass} 平均值小于全国尺度 1.50 mg/g^[22] 和全球尺度 1.80 mg/g^[21]。研究表明, 植物叶片的 P 含量与土壤 P 含量密切相关^[14], 中国区域植物叶片 P 含量较低可能是土壤 P 含量较低导致。在全球尺度, 植物叶片 P 含量和叶片 N 含量的变化规律一致, 随纬度的升高而增大^[24]。漓江流域岩溶石山植物叶片 P_{mass} 偏低, 可能由于该地区处于相对较低纬度, 以及中国区域土壤 P 含量较低和岩溶石山地区本身基岩裸露、土体浅薄造成的。 C/N 平均值为 35.46, 大于全球平均值 23.80^[21]; C/P 平均值为 711.21, 大于全球尺度 300.90^[21]。较高的 C/N 和 C/P 说明岩溶石山地区的植物在养分缺乏的情况下仍保持较高的同化能力, 植物的生长速率及植物对 N、P 的利用效率都较高。根据 Koerselman 等^[25]提出养分限制阈值, 即叶片 $N/P > 16$ 和 $N/P < 14$ 分别表示植物受 P 和 N 限制。本研究中, N/P 平均值为 20.98 > 16 , 大于全国尺度 13.80^[22] 和全球尺度 18.68^[21], 这表明漓江流域岩溶石山植物的生长主要受 P 限制。

4.2 叶片养分组成分析

植物叶片中的养分元素并不是独立存在的, 一种元素的吸收和转运可能受另一种或几种元素的影响, 它们之间存在着一定的联系。研究表明, 岩溶石山植物叶片 C% 与 N%(P%) 的显著负相关性以及叶片 N% 与 P% 的显著正相关性, 是高等陆生植物 C、N 和 P 元素计量特征的普遍规律之一, 体现了绿色植物在固碳过程中养分(N、P 等)利用效率的权衡策略。漓江流域岩溶石山植物叶片 C/N 与 C/P 呈显著正相关, 这与摩天岭北坡^[26]的研究结果一致, 表明植物叶片单位 N 所能同化的 C 的量越高, 则其单位 P 所能同化的 C 的量也就越高。

4.3 聚类分析

聚类分析表明, 50 种常见植物可划分为三类。根据植物叶片 8 个养分指标的平均值, 将三类植物归类为喜钙植物、高生产力植物、耐旱型植物。第一类植物叶片 Ca 含量的平均值最大, 表明第一类植物对喀斯特石山高钙生境具有较强的适应性, N/P 为 15.737, 大于 14, 小于 16, 表明第一类植物同时受 N 和 P 限制。张习敏^[27]研究发现, 喜钙植物在高钙环境下能够提高植物叶片 NADH-GOGAT 活性, 加速植物对氮的吸收, 具有适应高钙和低氮环境的特性。第二类植物叶片中 C、C/N、C/P 和 N/P 的平均值最大, 其中 C、C/N 和 C/P 是养分利用效率指标, $N/P > 16$, 表明第二类植物具有较高的养分利用效率且受土壤有效 P 的限制最大。第三类植物叶片 N、P、K 的平均值最高, 植物对土壤有效 N、P 的利用最大, 而 K 越高的植物对干旱的适应能力越强, $N/P > 16$, 表明第三类植物对土壤养分的吸收效率最大, 且具有耐干旱的特性, 但受土壤有效磷限制。

相关研究表明, 不同岩性条件、土地利用类型中的土壤养分存在着显著差异^[28]。喀斯特山区土壤钙镁含量高, 土壤贫瘠, 植物普遍受氮、磷限制。根据植物叶片养分含量指标, 将漓江流域 50 种常见植物可分为三类

植物,分别为喜钙植物、高生产力植物和耐旱型植物。喜钙植物具有高度适应喀斯特岩溶石山环境的特性,叶片 C 含量、C/N、C/P 和 N/P 比值较低于第二类高生产力植物,N、P 和 K 含量较低于第三类耐旱型植物,因此本研究中的喜钙植物也具有较高的生产力和一定的耐旱性特性。基于喀斯特生境土壤养分、水分等各方面因素,我们认为在石漠化治理过程中,喜钙植物应作为首选物种,其次为耐旱型植物和高生产力植物。本研究中未对 30 种喜钙植物具体哪一物种为最佳物种进行分析,因此还需进一步研究讨论。此外,针对不同土地利用类型的喀斯特生境石漠化的治理,还需结合其他相关指标进一步分析。

参考文献 (References):

- [1] 付作琴,吕茂奎,李晓杰,任寅榜,聂阳意,邓翠,曾敏,张康靖,阮超越,谢锦升. 武夷山不同海拔黄山松新叶和老叶氮磷化学计量特征. 生态学报, 2019, 38(3): 648-654.
- [2] 崔珺,柯立,张驰,周佳佳,徐小牛. 皖南亚热带常绿阔叶林下灌木层主要树种叶片养分特征. 植物资源与环境学报, 2014, 23(2): 34-40.
- [3] 宁志英,李玉霖,杨红玲,张子谦. 科尔沁沙地优势固沙灌木叶片氮磷化学计量内稳性. 植物生态学报, 2019, 43(1): 46-54.
- [4] 杨幸,王平,高大威,高宁宁,李璐杉,杨晓柳,钟乾娟. 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. 生态学报, 2019, 39(11): 4021-4028.
- [5] 朱育锋,吴玲,李舒惠,彭晚霞,杜虎,刘永贤,兰秀,宋敏. 广西桉树碳氮磷分配格局及其生态化学计量特征. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2019, 45(2): 166-171.
- [6] 马露莎,陈亚南,张向茹,杨佳佳,安韶山. 黄土高原刺槐叶片生态化学计量学特征. 水土保持研究, 2014, 21(3): 57-61, 67-67.
- [7] 吴建召,崔羽,贺静雯,刘颖,李健,林勇明,王道杰,吴承祯. 震区生态治理初期植物、土壤的养分含量及叶片化学计量特征. 北京林业大学学报, 2019, 41(2): 41-52.
- [8] 王虎兵,曹红霞,郝舒雪,潘小燕. 温室番茄植株养分和光合对水肥耦合的响应及其与产量关系. 中国农业科学, 2019, 52(10): 1761-1771.
- [9] 刘落鱼,潘澜,侯晓丽,许建新,薛立. 两种基质对三种室内垂直绿化植物叶片养分含量和叶绿素荧光的影响. 广东农业科学, 2018, 45(7): 40-47.
- [10] 王丽霞,黄大野,林妃,殷晓敏,何应对,王必尊. 外源硒对福橙叶片光合特性和叶片养分含量的影响. 湖北农业科学, 2019, 58(5): 61-66.
- [11] 金月,梁存柱,崔利剑. 不同养分添加对草地群落优势植物叶片化学计量特征的影响. 北方农业学报, 2019, 47(2): 59-65.
- [12] 阮科,朱礼乾,沈鑫健,周上铃,彭良志,凌丽俐,黄涛江,刘文华,淳长品. 奉节脐橙园土壤养分状况普查及其与叶片养分和产量相关性研究. 果树学报, 2019, 36(4): 458-467.
- [13] 杨焕莹,宋建达,周焘,金光泽,姜峰,刘志理. 林分、土壤及空间因子对谷地云冷杉林叶面积指数空间异质性的影响. 植物生态学报, 2019, 43(4): 342-351.
- [14] 王璐,喻阳华,邢容容,秦仕忆. 喀斯特高寒干旱区不同经济树种的碳氮磷钾生态化学计量特征. 生态学报, 2018, 38(15): 5393-5403.
- [15] 温培才,王霖娇,盛茂银. 我国西南喀斯特森林生态系统生态化学计量学研究. 世界林业研究, 2018, 31(2): 66-71.
- [16] 盘远方,陈兴彬,姜勇,梁士楚,陆志任,黄宇欣,倪鸣源,覃彩丽,刘润红. 桂林岩溶石山灌丛植物叶功能性状和土壤因子对坡向的响应. 生态学报, 2018, 38(5): 1581-1589.
- [17] 马姜明,黄婧,杨栋林,梅军林. 桂林喀斯特石山 50 种常见植物叶片光合色素含量及耐荫性定量评价. 林业科学, 2015, 51(10): 67-74.
- [18] 胡芳,杜虎,曾馥平,宋同清,彭晚霞,张芳. 典型喀斯特峰丛洼地不同植被恢复对土壤养分含量和微生物多样性的影响. 生态学报, 2018, 38(6): 2170-2179.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [20] 罗绪强,张桂玲,阮英慧,刘兴,杨鸿雁,郑延丽. 雷公山自然保护区常见植物叶片营养元素含量及其化学计量特征. 江苏农业科学, 2019, 47(11): 309-312.
- [21] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(30): 11001-11006.
- [22] Han W X, Fang J Y, Reich P B, Ian Woodward F, Wang Z H. Biogeography and variability of eleven mineral elements in plant leaves across gradients of climate, soil and plant functional type in China. Ecology Letters, 2011, 14(8): 788-796.
- [23] Rivas-Ubach A, Sardans J, Pérez-Trujillo M, Estiarte M, Peñuelas J. Strong relationship between elemental stoichiometry and metabolome in plants. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(11): 4181-4186.
- [24] 张亚冰,吕文强,周传艳,吴永贵,周少奇. 贵州月亮山 5 个优势树种叶片与土壤生态化学计量特征. 水土保持研究, 2017, 24(5): 182-188.
- [25] Koerselman W, Meuleman A F M. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation. Journal of Applied Ecology, 1996, 33(6): 1441-1450.
- [26] 何桂萍,田青,李宗杰,宋玲玲,张守昊,曹雪萍. 摩天岭北坡常绿阔叶林带主要优势种叶片 C、N、P 特征分析. 甘肃农业大学学报, 2019, 54(1): 129-136, 143-143.
- [27] 张习敏. 喜钙植物叶片细胞内 Ca^{2+} 动态分布和 Ca^{2+} 对氮、磷亏缺影响研究. 贵阳: 贵州师范大学, 2008.
- [28] Li D J, Wen L, Zhang W, Yang L Q, Xiao K C, Chen H, Wang K L. Afforestation effects on soil organic carbon and nitrogen pools modulated by lithology. Forest Ecology and Management, 2017, 400: 85-92.