

陈柯豪,杜红梅,刘春江.云南喀斯特断陷盆地典型群落植物生态化学计量学特征[J].中国岩溶,2020,39(6):883-893.  
DOI:10.11932/karst20200609

# 云南喀斯特断陷盆地典型群落植物生态 化学计量学特征

陈柯豪,杜红梅,刘春江  
(上海交通大学农业与生物学院,上海200240)

**摘要:**喀斯特地区地质化学、气候和人类活动强烈影响植物群落组成、植物元素含量和化学计量特征。本文以云南省蒙自市断陷盆地区天然林、灌丛和草地群落植物为对象,研究了植物叶片12种元素含量和生态化学计量特征。结果显示:研究区内植物元素含量存在较大差异,各元素含量从高到低的顺序依次是 $C > Ca > N > K > Mg > P > Fe > Al > Zn > Mn > Na > Cu$ ,三种群落植物N、K、Ca、Mg、Al、Cu、Zn、Mn含量存在显著差异。天然林与灌丛群落植物生长受到P含量的限制,而草地群落植物生长受到N与P单独或共同的影响。草地群落植物C:N、C:Ca、C:Mg显著高于天然林与灌丛植物,N:P则呈现相反格局。三种群落间植物C:Ca比例显著不同,表现为草地>天然林>灌丛。在研究区内,有27对元素含量呈现显著相关,占总元素对的40.9%。这些结果表明,云南喀斯特断陷盆地植物为适应环境,形成了独特的化学计量特征和适应策略。

**关键词:**喀斯特;断陷盆地;植物群落;元素;生态化学计量学

中图分类号:Q948

文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2020)06-0883-11 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## 0 引言

生态系统的退化过程是复杂的,有其自然属性决定的内在原因,而加速其退化的驱动力是外在干扰<sup>[1]</sup>。在内动力机制和外力影响下,原生喀斯特天然林易于退化形成灌丛群落和草地群落。喀斯特生态系统重要性质之一是其脆弱性,即由于气候和地质原因,一旦原始生态系统遭受干扰,容易发生显著改变,而且难于启动恢复演替<sup>[2]</sup>。植物营养元素含量和化学计量特征有内稳性,同时也受到气候条件、地质化学、土壤性质和生物干扰的影响<sup>[3]</sup>。植物叶片是植物代谢活动最活跃的器官,其营养元素组成和含量是对矿质元素选择吸收与积累的结果,也是其代谢类型和所处环境情况的反映,植物叶片营养元素含量能较好地反映植物生长过程中出现的营养问题<sup>[4]</sup>。

植物叶片营养元素含量和计量特征,是判断植物营养水平、研究土地养分供给状况和营养元素生物地球化学循环的基础<sup>[5]</sup>。

对喀斯特地区植物群落的特点、退化机理、演替过程等问题已有较多的研究。沈有信等<sup>[6-7]</sup>以物种组成、群落高度、植物生物量、土壤繁殖体库、土壤理化性质、群落间相异性指数为指标,通过聚类分析将滇东的喀斯特退化植物群落分为顶级群落、乔林、灌乔、灌丛灌木、草灌和草本群落6个阶段,并探讨了这些群落演替动态和可能趋势<sup>[7]</sup>。依据非线性理论,甘露展示了人类活动对喀斯特生态系统作用的非线性、不对称性特点,并探讨了其混沌特征<sup>[2]</sup>。特别是,在我国实施退耕还林、生物多样性保护、脱贫致富等国家战略的形势下,了解喀斯特地区植物群落分布格局、演替特点和趋势及驱动因素成为生态学研究

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0502501)

第一作者简介:陈柯豪(1994—),男,硕士研究生,研究方向:园林植物。E-mail:dnchen@126.com。

通信作者:杜红梅(1974—),女,博士,副教授,研究方向:园林植物。E-mail:hmd@sjtu.edu.cn;刘春江(1957—),男,博士,教授,研究方向:生态学。E-mail:chjliu@sjtu.edu.cn。

收稿日期:2019-02-20

的热点问题<sup>[8]</sup>。

喀斯特地区具有土壤浅薄、土壤pH值高、土壤—植被系统钙和镁含量高、生态系统脆弱等特征<sup>[9]</sup>。云南省蒙自市处于典型的喀斯特断陷盆地石漠化地区,流域面积巨大;盆—山地地形变化剧烈,气候反差大;降水偏少,地表缺水,地下水埋藏深;水土资源分离;立地条件差<sup>[10-11]</sup>。当地天然植被受到了强烈的人为干扰,多数地区退化形成了灌丛和草地群落,天然森林群落仅在偏远地区以及一些村落周边作为景观林分残存<sup>[12]</sup>。这些不同的植物群落,为研究喀斯特断陷盆地植物生态化学计量学提供了典型样地。本研究以蒙自喀斯特断陷盆地天然林分、灌丛和草地群落植物为研究对象,测定植物叶片12种元素含量,并分析化学计量特征,以期探讨喀斯特断陷盆地植

物生态化学计量学特征及其适应意义,为喀斯特退化生态系统修复和生态环境保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

根据当地植被分布特点,在蒙自市的东、西、南、北4个方位选择样带(表1),在每个样带选择典型植物群落。在本次调查中,在西北勒—蒙自样带选择了3个植物群落;冷泉村—蒙自样带选取了4个植物群落;小雀吃水村—蒙自样带,选择了3个植物群落;在芷村镇—蒙自样带,选择了3个植物群落。在每个植物群落样地内,设立3个20 m×20 m的样方,各样方之间完全独立。在每个样方内,各选取当中的优势植物种作为研究对象,各群落优势植物种见表2。

表1 蒙自喀斯特断陷盆地植物群落样带和样地地理位置

Table 1 Geographical location of study site in karst fault basin of Mengzi, Yunnan province

| 调查样带          | 样地       | 经纬度                     | 海拔/m  |
|---------------|----------|-------------------------|-------|
| 西北勒—蒙自样带(北)   | S1(天然林分) | N23. 476 ° ,E103. 475 ° | 1 440 |
|               | S2(灌丛群落) |                         | 1 650 |
|               | S3(草地群落) |                         | 1 820 |
| 冷泉村—蒙自样带(南)   | S1(灌丛群落) | N23. 191 ° ,E103. 353 ° | 1 570 |
|               | S2(灌丛群落) |                         | 1 590 |
|               | S3(草地群落) |                         | 1 650 |
|               | S4(灌丛群落) |                         | 1 620 |
| 小雀吃水村—蒙自样带(西) | S1(灌丛群落) | N23. 302 ° ,E103. 304 ° | 1 320 |
|               | S2(草地群落) |                         | 1 360 |
|               | S3(草地群落) |                         | 1 490 |
| 芷村镇—蒙自样带(东)   | S1(天然林分) | N23. 369 ° ,E103. 526 ° | 1 530 |
|               | S2(草地群落) |                         | 1 590 |
|               | S3(灌丛群落) |                         | 1 680 |

表2 蒙自样带植物群落优势种组成表

Table 2 Dominant species in different plant communities of study site in Mengzi

| 样地       | 分类 | 植物种                                                |
|----------|----|----------------------------------------------------|
| 西北勒—蒙自样带 |    |                                                    |
| S1       | 乔木 | 云南松、椎连栎、滇青冈、窄叶石栎、漆树、马尾松                            |
|          | 灌木 | 菝葜、常春藤、马桑、忍冬、栒子、头状四照花、蔷薇、薄叶鼠李、灰叶栒子、勾儿茶、盐肤木         |
|          | 草本 | 茜草                                                 |
|          | 蕨类 | 密毛蕨                                                |
| S2       | 乔木 | 滇素馨、窄叶石栎、滇青冈、木樨榄、椎连栎                               |
|          | 灌木 | 勾儿茶、薄叶鼠李、窄叶石栎、绣线菊、多花杭子哨、马桑、车桑子、金丝桃、栒子、盐肤木、多花杭子哨、菝葜 |
|          | 草本 | 黄茅、黄花蒿、羊耳菊                                         |
|          | 蕨类 | 密毛蕨                                                |

| 续表         |    |                                         |
|------------|----|-----------------------------------------|
| 样地         | 分类 | 植物种                                     |
| S3         | 灌木 | 车桑子、小铁仔、野把子                             |
|            | 草本 | 黄茅、紫茎泽兰、黄花蒿、龙须草、刺芒野古草                   |
| 冷泉村—蒙自样带   |    |                                         |
| S1         | 乔木 | 滇素馨                                     |
|            | 灌木 | 薄叶鼠李、青荚叶、昆明海桐、车桑子、臭荚蒾、勾儿茶、菝葜、常春藤、小铁仔    |
|            | 草本 | 荨麻、黄茅                                   |
|            | 蕨类 | 密毛蕨                                     |
| S2         | 乔木 | 合欢                                      |
|            | 灌木 | 沙针、马桑、勾儿茶、菝葜、多花蔷薇、薄叶鼠李、绣线菊              |
|            | 草本 | 黄花蒿、荨麻、黄背草                              |
|            | 蕨类 | 蜈蚣草、密毛蕨                                 |
| S3         | 乔木 | 山玉兰、滇青冈、白枪杆、滇素馨                         |
|            | 灌木 | 车桑子、圣诞树、余甘子、沙针、勾儿茶、薄叶鼠李、菝葜、清香木          |
|            | 草本 | 黄茅                                      |
|            | 蕨类 | 密毛蕨                                     |
| S4         | 乔木 | 滇青冈、窄叶石栎                                |
|            | 灌木 | 余甘子、清香木、华西小石积、勾儿茶、密花荚蒾、小铁仔、绣线菊、薄叶鼠李     |
|            | 草本 | 黄茅、龙须草                                  |
|            | 蕨类 | 密毛蕨                                     |
| 小雀吃水村—蒙自样带 |    |                                         |
| S1         | 乔木 | 滇素馨、滇青冈、窄叶石栎、漆树                         |
|            | 灌木 | 华西小石积、臭荚蒾、勾儿茶、菝葜、薄叶鼠李、绣线菊、密花荚蒾、多花杭子哨、马桑 |
|            | 草本 | 黄背草                                     |
| S2         | 乔木 | 漆树                                      |
|            | 灌木 | 沙针、薄叶鼠李、华西小石积、臭荚蒾、小铁仔、多花杭子哨、            |
|            | 草本 | 紫茎泽兰、羊耳菊、茜草、黄背草                         |
|            | 蕨类 | 密毛蕨                                     |
| S3         | 乔木 | 白枪杆、滇青冈、锥连栎                             |
|            | 灌木 | 小铁仔、密花荚蒾、野把子、勾儿茶                        |
|            | 草本 | 黄茅、茜草、黄背草、龙须草、羊耳菊                       |
| 芷村—蒙自样带    |    |                                         |
| S1         | 乔木 | 滇青冈、滇素馨、漆树、窄叶石栎、锥连栎                     |
|            | 灌木 | 小铁仔、清香木、菝葜、白刺花、勾儿茶、昆明海桐、马桑              |
|            | 草本 | 黄茅、茜草                                   |
|            | 蕨类 | 密毛蕨                                     |
| S2         | 乔木 | 圆柏、滇素馨                                  |
|            | 灌木 | 勾儿茶、栒子、车桑子、小铁仔                          |
|            | 草本 | 紫茎泽兰、羊耳菊                                |
| S3         | 乔木 | 滇青冈、窄叶石栎                                |
|            | 灌木 | 小铁仔、忍冬、密花荚蒾、车桑子、多花杭子哨、白刺花、清香木、绣线菊       |
|            | 草本 | 荨麻、酸浆、黄茅、茜草、紫茎泽兰、羊耳菊                    |

1.2 样本采集

调查于 2016 年 9 月进行。在每个样方 (20 m×20 m) 内, 对其中的优势植物种, 从各生长状况良好植

物种的不同植株上采集叶片样本, 选取 3~5 棵长势良好的植株, 在植株向阳一侧选择中部枝条采集中等大小的叶片数枚, 然后混合成一个复合样品; 经过

120 ℃杀青后并在 60 ℃下干燥 48 h,最后研磨成粉末样品。

### 1.3 植物元素含量测定

植物叶片 C、N 总量用元素分析仪 (Vario ELIII; Elementar, Germany) 测定。用电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-OES, Iris Advantage 1 000; Thermo Jarrell Ash, Franklin, MA) 测定植物样品 P、K、Ca、Mg、Na、Fe、Al、Cu、Zn、Mn 总量。

### 1.4 数据处理

使用 Microsoft Excel 2013、IBM SPSS Statistics 19 等软件对实验数据进行处理及统计分析,用 Origin 9.0 软件绘图。

## 2 结 果

### 2.1 植物叶片元素含量

蒙自喀斯特断陷盆地植物叶片平均元素含量见表 3。本次测量的 12 种元素中,平均含量在  $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  以上的元素有 C、N、Ca,平均含量大于  $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  小于  $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  的元素有 K、P、Mg,平均含量在  $0.1 \sim 1.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  间的元素有 Fe、Al、Zn、Mn,平均含量在  $0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  以下的元素有 Na、Cu。

植物元素含量变异系数大小顺序依次为,Al、Fe、Mn、Na、Cu、Mg、Ca、Zn、K、P、N、C。其中,变异系数大

于 50% 的元素有 Al、Fe、Mn、Na、Cu、Mg、Ca、Zn、K,小于 50% 的有 P、N、C,以 Al 最大,高达 327.2%,除 C 之外 N 最小,为 30.1%。

根据统计分析,各种植物的元素含量见图 1 和图 2。12 种元素含量最高和最低的植物分别是:N,余甘子 (*Phyllanthus emblica*) 和 枸 子 (*Rosaceae Cotoneaster*); P,绣线菊 (*Spiraea salicifolia*) 和白刺花 (*Sophora davidii*); K,绣线菊和白刺花; Ca,荨麻 (*Urtica fissa*) 和云南松 (*Pinus yunnanensis*); Mg,荨麻和茜草 (*Rubia cordifolia*); Al,滇素馨 (*Jasminum subhumile*) 和余甘子; Fe,余甘子和清香木 (*Pistacia weinmannifolia*); Mn,滇青冈 (*Cyclobalanopsis glaucoides*) 和余甘子; Na,绣线菊和多花蔷薇 (*Rosa multiflora*); Cu,白牛胆 (*Inula cappa*) 和常春藤 (*Hedera nepalensis*); Zn,紫茎泽兰 (*Eupatorium adenophora*) 和余甘子。

由图 1 和图 2 还可以看出,在本次调查的植物中,有些植物元素含量类似,有些植物元素含量差异显著,形成了植物元素含量谱。根据各植物元素含量,可以看出该地区元素高含量特异性植物,如余甘子 (N、Fe 和 Cu)、绣线菊 (P、K 和 Na)、荨麻 (Ca 和 Mg)、滇素馨 (Al)、白牛胆 (Cu)、紫茎泽兰 (Zn)、滇青冈 (Mn) 等。同时,也可以发现,这些元素含量较高的植物,其元素含量变异性也较大,表现出对环境的适应性。

### 2.2 不同群落植物叶片元素含量

对三种植物群落而言,在植物叶片 12 种元素中, N、K、Ca、Mg、Al、Cu、Zn、Mn 存在着显著差异 (图 3)。其中,草地群落植物 N、Ca、Mg 含量显著较低,而 Zn、Cu 含量则显著高于其它两种群落;天然林群落的 Al、Mn 含量要显著高于灌丛和草地群落;在三种群落中, K 的含量存在显著差异,其顺序为天然林 > 灌丛 > 草地。

在 5 种功能型植物中,叶片元素含量因所处群落生境的改变而显现差异。其中,常绿乔木有 8 种元素 (K、Ca、Mg、Na、Al、Cu、Zn、Mn)、落叶乔木有 4 种元素 (P、K、Na、Cu)、常绿灌木有 4 种元素 (C、Ca、Cu、Mn)、落叶灌木有 7 种元素 (N、K、Ca、Mg、Cu、Zn、Mn)、草本植物有 3 种元素 (Fe、Al、Mn) 在三种立地上有着显著差异。在天然林群落,常绿乔木 Na、Al 和 Mn、落叶乔木 K 和 Na、草本植物 Fe、Al 和 Mn 含量比灌丛和草地群落更高。相对于天然林和灌丛群落而言,草地群落上常绿乔木 Cu 和 Zn、落叶乔木 P 和 Cu、常绿灌木 C 和 Cu、落叶灌木 Cu、Zn 和 Mn 有着更高的含量 (表 4)。

表 3 蒙自喀斯特断陷盆地植物叶片元素含量

Table 3 Element contents of plant leaves in karst faulted basin of Mengzi

|    | 元素/ $\times 10^{-6}$ |        |        |        | 标准差   | 变异系数/% |
|----|----------------------|--------|--------|--------|-------|--------|
|    | 极大值                  | 极小值    | 中值     | 均值     |       |        |
| C  | 540.57               | 314.07 | 465.57 | 465.05 | 31.21 | 6.7    |
| N  | 41.42                | 6.29   | 17.36  | 18.04  | 5.43  | 30.1   |
| P  | 3.16                 | 0.35   | 1.07   | 1.15   | 0.40  | 35.2   |
| K  | 33.94                | 1.77   | 7.20   | 9.02   | 5.84  | 64.7   |
| Ca | 108.40               | 3.31   | 16.99  | 20.32  | 13.67 | 67.3   |
| Mg | 25.25                | 0.56   | 2.88   | 3.37   | 2.29  | 68.1   |
| Na | 1.74                 | 0.01   | 0.07   | 0.09   | 0.13  | 140.9  |
| Fe | 7.61                 | 0.04   | 0.16   | 0.25   | 0.56  | 224.3  |
| Al | 6.86                 | 0.01   | 0.07   | 0.17   | 0.55  | 327.2  |
| Cu | 0.02                 | 0.00   | 0.00   | 0.01   | 0.00  | 75.9   |
| Zn | 0.60                 | 0.02   | 0.11   | 0.13   | 0.09  | 66.2   |
| Mn | 1.80                 | 0.01   | 0.06   | 0.13   | 0.20  | 153.5  |



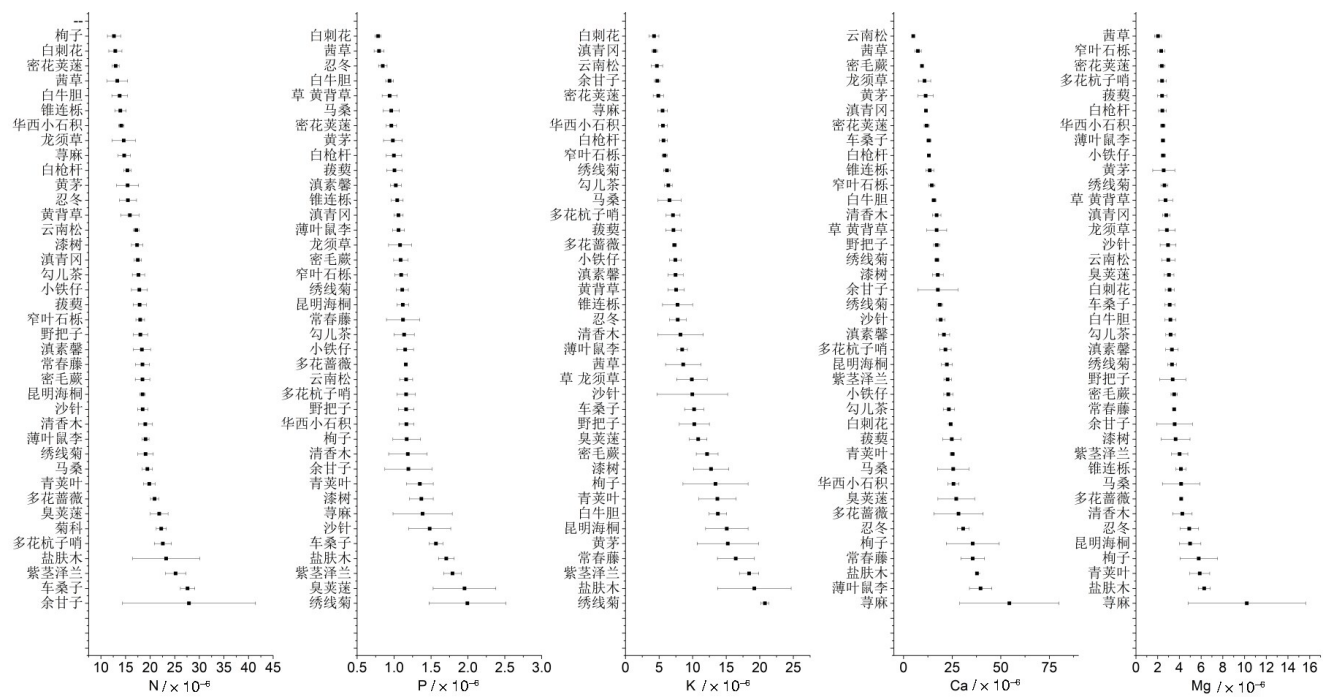


图 1 蒙自不同植物叶大量元素平均含量

Fig. 1 Major element contents in leaves of different plants in Mengzi (mean $\pm$ SE)

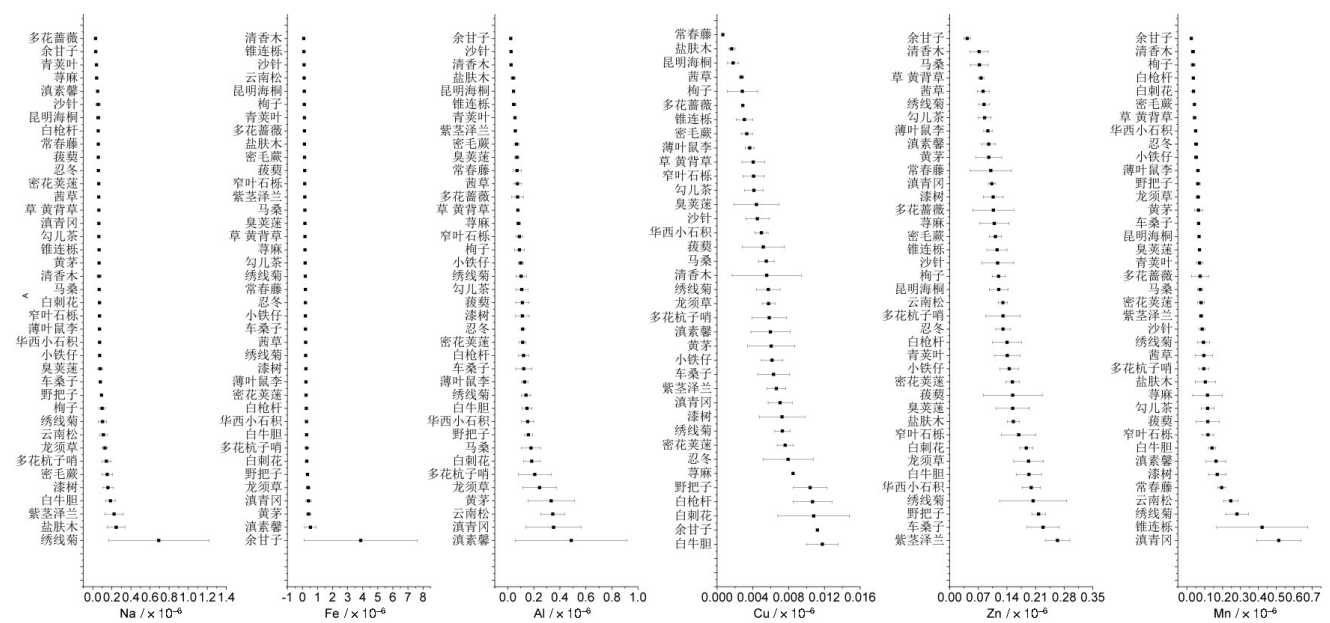


图 2 蒙自不同植物叶微量元素平均含量

Fig. 2 Microelement contents in leaves of different plants in Mengzi (mean $\pm$ SE)

表 4 不同群落中不同功能型植物元素平均含量表

| Table 4 Element contents of plants with different functional types in different communities (mean $\pm$ SE) |                      |                     |                     |                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 植物功能型                                                                                                       | 元素/ $\times 10^{-6}$ | 天然林                 | 灌丛                  | 草地                  |
| 常绿乔木                                                                                                        | C                    | 484.70 $\pm$ 6.74 a | 482.08 $\pm$ 8.86 a | 485.50 $\pm$ 3.74 a |
|                                                                                                             | N                    | 18.94 $\pm$ 1.23 a  | 18.20 $\pm$ 0.98 a  | 16.81 $\pm$ 1.05 a  |
|                                                                                                             | P                    | 1.02 $\pm$ 0.04 a   | 1.02 $\pm$ 0.05 a   | 1.16 $\pm$ 0.08 a   |
|                                                                                                             | K                    | 7.43 $\pm$ 0.98 a   | 5.90 $\pm$ 0.44 a   | 4.04 $\pm$ 0.28 b   |

| 续表    |                      |                      |                      |                     |
|-------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| 植物功能型 | 元素/ $\times 10^{-6}$ | 天然林                  | 灌丛                   | 草地                  |
|       | Ca                   | 13.98 $\pm$ 1.61 ab  | 19.08 $\pm$ 2.40 a   | 11.14 $\pm$ 0.77 b  |
|       | Mg                   | 3.34 $\pm$ 0.33 a    | 3.36 $\pm$ 0.47 a    | 2.10 $\pm$ 0.25 b   |
|       | Na                   | 0.09 $\pm$ 0.01 a    | 0.05 $\pm$ 0.004 b   | 0.06 $\pm$ 0.005 b  |
|       | Fe                   | 0.63 $\pm$ 0.34 a    | 0.12 $\pm$ 0.01 a    | 0.22 $\pm$ 0.03 a   |
|       | Al                   | 0.67 $\pm$ 0.37 a    | 0.06 $\pm$ 0.01 b    | 0.13 $\pm$ 0.03 ab  |
|       | Cu                   | 0.004 $\pm$ 0.002 b  | 0.003 $\pm$ 0.0005 b | 0.01 $\pm$ 0.001 a  |
|       | Zn                   | 0.10 $\pm$ 0.01 b    | 0.09 $\pm$ 0.01 b    | 0.18 $\pm$ 0.04 a   |
|       | Mn                   | 0.40 $\pm$ 0.08 a    | 0.15 $\pm$ 0.04 b    | 0.28 $\pm$ 0.11 ab  |
| 落叶乔木  | C                    | 459.01 $\pm$ 5.05 a  | 471.92 $\pm$ 9.8 a   | 469.61 $\pm$ 8.00 a |
|       | N                    | 18.59 $\pm$ 0.01 a   | 19.37 $\pm$ 4.5 a    | 18.81 $\pm$ 2.02 a  |
|       | P                    | 1.29 $\pm$ 0.1 ab    | 0.98 $\pm$ 0.12 b    | 1.33 $\pm$ 0.12 a   |
|       | K                    | 15.55 $\pm$ 2.6 a    | 6.76 $\pm$ 2.07 b    | 6.65 $\pm$ 0.9 b    |
|       | Ca                   | 20.27 $\pm$ 3.41 a   | 17.73 $\pm$ 3.66 a   | 15.47 $\pm$ 1.91 a  |
|       | Mg                   | 5.35 $\pm$ 2.06 a    | 4.37 $\pm$ 1.42 a    | 2.6 $\pm$ 0.29 a    |
|       | Na                   | 0.24 $\pm$ 0.08 a    | 0.07 $\pm$ 0.03 b    | 0.08 $\pm$ 0.01 b   |
|       | Fe                   | 0.31 $\pm$ 0.07 a    | 1.38 $\pm$ 1.25 a    | 0.26 $\pm$ 0.05 a   |
|       | Al                   | 0.21 $\pm$ 0.06 a    | 1.18 $\pm$ 1.14 a    | 0.11 $\pm$ 0.03 a   |
|       | Cu                   | 0.002 $\pm$ 0.001 b  | 0.008 $\pm$ 0.003 ab | 0.009 $\pm$ 0.002 a |
|       | Zn                   | 0.08 $\pm$ 0.01 a    | 0.08 $\pm$ 0.03 a    | 0.14 $\pm$ 0.03 a   |
|       | Mn                   | 0.09 $\pm$ 0.04 a    | 0.23 $\pm$ 0.16 a    | 0.13 $\pm$ 0.04 a   |
| 常绿灌木  | C                    | 450.18 $\pm$ 3.88 b  | 465.97 $\pm$ 5.83 ab | 475.36 $\pm$ 5.25 a |
|       | N                    | 18.45 $\pm$ 1.34 a   | 17.47 $\pm$ 1.16 a   | 15.9 $\pm$ 1.02 a   |
|       | P                    | 1.07 $\pm$ 0.09 a    | 1.19 $\pm$ 0.09 a    | 1.07 $\pm$ 0.09 a   |
|       | K                    | 11.43 $\pm$ 1.7 a    | 9.8 $\pm$ 1.25 a     | 7.52 $\pm$ 1.46 a   |
|       | Ca                   | 27.55 $\pm$ 2.98 a   | 26.67 $\pm$ 2.7 a    | 17.29 $\pm$ 1.81 b  |
|       | Mg                   | 4.31 $\pm$ 0.7 a     | 3.99 $\pm$ 0.5 a     | 3.02 $\pm$ 0.28 a   |
|       | Na                   | 0.07 $\pm$ 0.01 a    | 0.07 $\pm$ 0.01 a    | 0.07 $\pm$ 0.01 a   |
|       | Fe                   | 0.14 $\pm$ 0.01 a    | 0.16 $\pm$ 0.02 a    | 0.19 $\pm$ 0.02 a   |
|       | Al                   | 0.07 $\pm$ 0.01 a    | 0.07 $\pm$ 0.02 a    | 0.09 $\pm$ 0.01 a   |
|       | Cu                   | 0.002 $\pm$ 0.0004 b | 0.003 $\pm$ 0.001b   | 0.008 $\pm$ 0.001 a |
|       | Zn                   | 0.10 $\pm$ 0.01 a    | 0.12 $\pm$ 0.01 a    | 0.14 $\pm$ 0.02 a   |
|       | Mn                   | 0.2 $\pm$ 0.11 a     | 0.06 $\pm$ 0.01 b    | 0.07 $\pm$ 0.01 b   |
| 落叶灌木  | C                    | 471.7 $\pm$ 7.08 a   | 461.6 $\pm$ 4.17 a   | 466.38 $\pm$ 4.09 a |
|       | N                    | 18.13 $\pm$ 1.07 ab  | 19.34 $\pm$ 0.72 a   | 17.23 $\pm$ 0.79 b  |
|       | P                    | 1.1 $\pm$ 0.07 a     | 1.17 $\pm$ 0.05 a    | 1.21 $\pm$ 0.08a    |
|       | K                    | 10.04 $\pm$ 1.22 a   | 9.55 $\pm$ 0.68 a    | 7.1 $\pm$ 0.54 b    |
|       | Ca                   | 29.08 $\pm$ 3.39 a   | 26.71 $\pm$ 2.09 a   | 18.54 $\pm$ 1.18 b  |
|       | Mg                   | 4.05 $\pm$ 0.5 a     | 3.43 $\pm$ 0.27 a    | 2.56 $\pm$ 0.17 b   |
|       | Na                   | 0.08 $\pm$ 0.01 a    | 0.1 $\pm$ 0.01 a     | 0.08 $\pm$ 0.01 a   |
|       | Fe                   | 0.17 $\pm$ 0.03 a    | 0.21 $\pm$ 0.02 a    | 0.22 $\pm$ 0.03 a   |
|       | Al                   | 0.14 $\pm$ 0.03 a    | 0.12 $\pm$ 0.02 a    | 0.12 $\pm$ 0.02 a   |
|       | Cu                   | 0.003 $\pm$ 0.001 b  | 0.004 $\pm$ 0.001 b  | 0.009 $\pm$ 0.001 a |
|       | Zn                   | 0.1 $\pm$ 0.01 b     | 0.13 $\pm$ 0.01 b    | 0.17 $\pm$ 0.02 a   |
|       | Mn                   | 0.11 $\pm$ 0.04 ab   | 0.09 $\pm$ 0.01 b    | 0.14 $\pm$ 0.02 a   |

| 续表    |                      |                      |                      |                     |
|-------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| 植物功能型 | 元素/ $\times 10^{-6}$ | 天然林                  | 灌丛                   | 草地                  |
| 草本植物  | C                    | 438.13 $\pm$ 10.13 a | 441.55 $\pm$ 10.79 a | 446.2 $\pm$ 7.25 a  |
|       | N                    | 21.18 $\pm$ 2.52 a   | 19.25 $\pm$ 1.73 a   | 16.76 $\pm$ 1.49 a  |
|       | P                    | 1.11 $\pm$ 0.18 a    | 1.37 $\pm$ 0.15 a    | 1.2 $\pm$ 0.11 a    |
|       | K                    | 16.51 $\pm$ 4.45 a   | 12.33 $\pm$ 1.66 a   | 11.69 $\pm$ 1.65 a  |
|       | Ca                   | 14.42 $\pm$ 5.52 a   | 23.95 $\pm$ 6.31 a   | 16.17 $\pm$ 3.42 a  |
|       | Mg                   | 3.07 $\pm$ 0.94 a    | 3.62 $\pm$ 0.69 a    | 4.11 $\pm$ 0.97 a   |
|       | Na                   | 0.09 $\pm$ 0.03 a    | 0.24 $\pm$ 0.11 a    | 0.1 $\pm$ 0.02 a    |
|       | Fe                   | 0.4 $\pm$ 0.14 a     | 0.17 $\pm$ 0.01 b    | 0.27 $\pm$ 0.05 ab  |
|       | Al                   | 0.35 $\pm$ 0.15 a    | 0.06 $\pm$ 0.01 b    | 0.16 $\pm$ 0.05 ab  |
|       | Cu                   | 0.004 $\pm$ 0.001 a  | 0.005 $\pm$ 0.001 a  | 0.007 $\pm$ 0.001 a |
|       | Zn                   | 0.08 $\pm$ 0.01 a    | 0.16 $\pm$ 0.03 a    | 0.16 $\pm$ 0.02 a   |
|       | Mn                   | 0.16 $\pm$ 0.08 a    | 0.08 $\pm$ 0.02 b    | 0.06 $\pm$ 0.01 b   |

注:不同小写字母表示同一元素不同群落之间差异显著( $P\leqslant 0.05$ )。

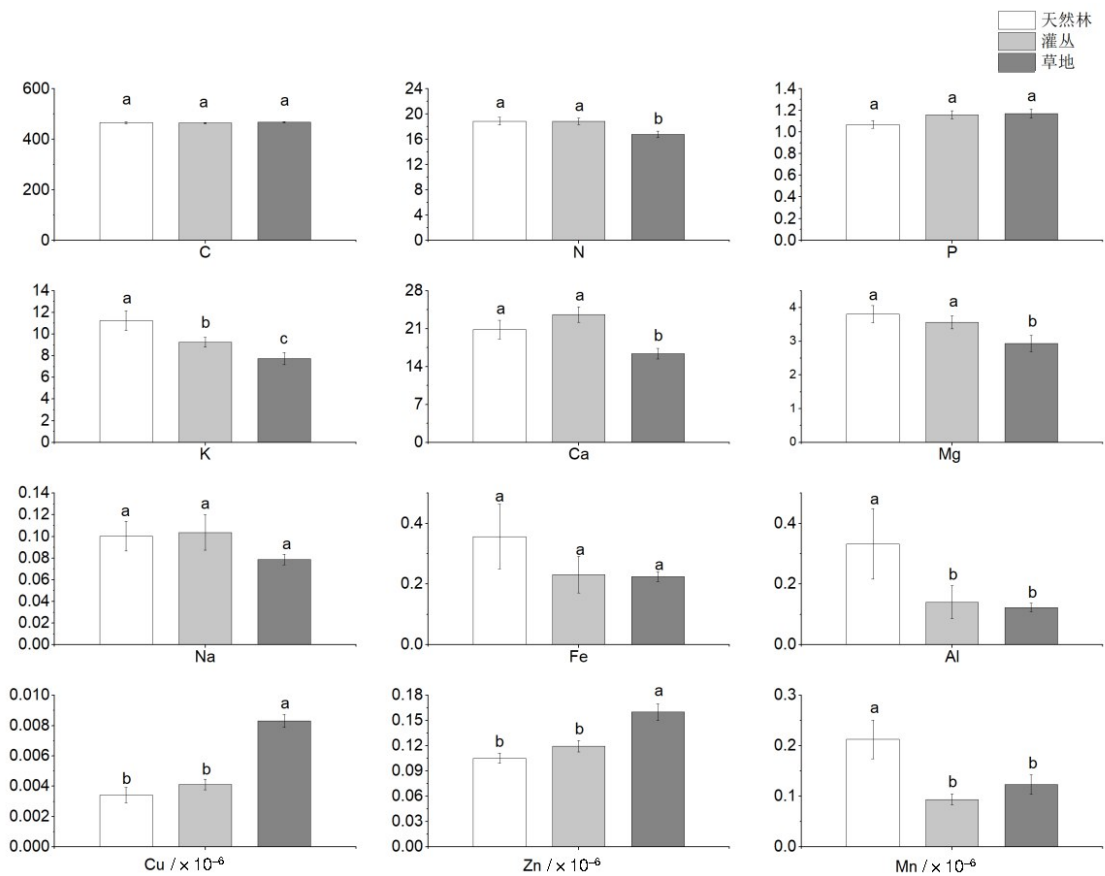


图3 不同群落植物叶片元素含量

Fig. 3 Element contents of plants in natural forests, shrub and grassland communities

注:不同小写字母表示同一元素不同群落之间差异显著( $P\leqslant 0.05$ )。

2.3 不同群落植物叶片化学计量学特征

在三种群落之间,植物C:N、N:P、C:Ca、C:Mg、Ca:Mg存在着显著差异(表5)。相对于天然林和灌丛群落,草地群落植物C:N、C:Ca、C:Mg

值更高,N:P则显著低于其它两种群落。三种群落间C:Ca均呈现差异,为草地>天然林>灌丛。灌丛群落植物Ca:Mg显著高于天然林和草地群落植物(表5)。

在 5 种功能型植物中,落叶乔木元素含量比值有着最高的稳定性,仅 C : P 存在显著差异。然而常绿乔木(除 C : N、C : P、C : Ca、N : Ca)有一半元素比值在 3 种立地间存有显著差异。除了常绿灌木的 C : Ca 和草本植物的 N : Ca 以外,所有功能型植物的 C : Ca 和 N : Ca 在三种立地上均无显著差异。常绿

乔木和草本植物在天然林群落有着更高的 N : P;常绿乔木、落叶灌木和草本植物在草地群落有较低的 N : P;常绿灌木和落叶灌木在草地群落有着更高的 C : N;常绿乔木和草本植物在灌丛群落上有着更高的 Ca : Mg(表 6)。

表 5 不同群落植物叶片元素含量间的比值

Table 5 Ratios of element contents in plant leaves of different communities

| 群落类型 | C : N   | C : P    | N : P   | C : Ca   | C : Mg   | N : Ca | N : Mg | Ca : Mg |
|------|---------|----------|---------|----------|----------|--------|--------|---------|
| 天然林  | 25.89 b | 456.74 a | 18.04 a | 35.04 ab | 164.26 b | 1.38 a | 6.44 a | 5.79 b  |
| 灌丛   | 26.58 b | 447.26 a | 17.30 a | 28.34 b  | 176.62 b | 1.14 a | 7.00 a | 7.86 a  |
| 草地   | 30.46 a | 450.88 a | 15.03 b | 38.70 a  | 216.93 a | 1.30 a | 7.37 a | 6.50 b  |

注:不同小写字母表示同一元素不同群落之间差异显著( $P \leq 0.05$ )。

## 2.4 元素间的相关性

由表 7 可见,在 66 个元素对中,有 27 对元素相关性显著,占总元素对的 40.9%。其中,具有极显著相关关系的有 20 对( $p \leq 0.01$ ),显著相关关系的有 7 对( $p \leq 0.05$ )。在具有极显著相关关系的元素对中,N 和 C、N 和 P、N 和 K、P 和 K、P 和 Cu、P 和 Zn、K 和 Mg、K 和 Na、K 和 Zn、Ca 和 Mg、Ca 和 Cu、Mg 和 Al、Na 和 Zn、Fe 和 Al、Fe 和 Cu、Cu 和 Zn 呈正相关关系,C 和 K、C 和 Ca、C 和 Mg、Ca 和 Cu 呈负相关关系。在具有显著相关关系的元素对中,N 和 Mg、N 和 Na、N 和 Al、P 和 Na、Fe 和 Mn、Al 和 Cu 呈正相关关系,C 和 Al 呈负相关关系。研究区内多种元素间存在着相关关系,说明植物内这些元素之间具有一定的比例组成和协调关系。

## 3 讨 论

本文研究结果表明,在喀斯特断陷盆地,由于人为影响形成了不同植物群落,群落间植物化学计量学也形成了显著差异。这意味着,植物为适应生长环境变化将采取不同适应策略<sup>[13]</sup>。从整体上看,云南喀斯特断陷盆地植物营养元素含量特点是  $Ca > K > Mg$ ,这与杨成、周运超<sup>[14-15]</sup>关于贵州喀斯特地区植物元素含量的研究结果相一致,即植被具有高钙特性。

研究区内,不同群落中植物元素含量存在差异,其中 N、K、Ca、Mg、Al、Cu、Zn、Mn 差异显著。不同元素在不同的群落内有着不一样的响应机制,植物元素含量的组成特征可能是其为适应不同生境的综合表现<sup>[16]</sup>。结果显示:草地群落内植物的 N、Ca、Mg 含

量显著较低,而 Zn、Cu 含量则显著高于其它两种群落;天然林群落植物的 Al、Mn 含量要显著高于灌丛和草地群落。在三种群落中,K 的含量存在显著差异且呈梯度变化,顺序为天然林>灌丛>草地,这与群落的退化程度有关。研究区内不同群落的稳定性顺序为天然林>灌丛>草地,植物越是处于不稳定的群落中越是需要竞争有限的养分,而植物中养分含量越低,其对养分的竞争能力越高<sup>[17]</sup>。不同功能型水平上,天然林群落内,常绿乔木的 Na、Al 和 Mn,落叶乔木的 K 和 Na,草本植物 Fe、Al 和 Mn 的含量比灌丛和草地群落更高。相对于天然林和灌丛群落而言,草地群落上木本植物(乔木、灌木)的 Cu 含量显著更高,这可能与木本植物富集重金属元素的能力有关<sup>[18]</sup>。由于喀斯特土壤富含 Ca、Mg,所以大多数植物富含钙镁,其中常绿植物 Ca、Mg 含量低于落叶植物,结果与周运超<sup>[15]</sup>和旷远文<sup>[19]</sup>研究结果一致。

各元素在植物生长过程中的相互作用可以表现为拮抗作用和协同作用两个方面。与单一的元素浓度相比,植物组织、器官元素浓度比值更能指示环境的变化<sup>[20-21]</sup>。通过对不同样地中植物叶片元素含量比值进行分析,从化学计量学的角度来看,三种不同样地因其所处的生境差异,其元素含量比值也存在一定的差异。对陆地生态系统的高等植物而言,当 N : P 比值大于 16 时,说明植物生长受到 P 含量的限制,当 N : P 比值小于 14 时,植物生长受到 N 含量的限制,而当 N : P 比值在 14 至 16 之间时,N 与 P 单独或共同影响植物的生长<sup>[22]</sup>。由表 5 可见,在蒙自的三种不同群落中,天然林与灌丛的植物 N : P 比值均大



表 6 不同群落中不同功能型植物元素平均含量比

Table 6 Ratios of element contents in plants with functional types of different communities (mean±SE)

| 植物功能型 | 元素比     | 天然林             | 灌丛             | 草地             |
|-------|---------|-----------------|----------------|----------------|
| 常绿乔木  | C : N   | 27.07±1.59 a    | 27.49±1.17 a   | 30.5±1.79 a    |
|       | C : P   | 486.47±18.88 a  | 500.22±32.91 a | 454.96±35.96 a |
|       | N : P   | 18.53±0.79 a    | 18.73±1.36 a   | 15.06±0.93 b   |
|       | C : Ca  | 47.18±8.93 a    | 33.1±3.95 a    | 47.3±3.73 a    |
|       | C : Mg  | 170.1±19.36 b   | 191±22.02 b    | 277.05±29.76 a |
|       | N : Ca  | 1.76±0.29 a     | 1.24±0.16 a    | 1.66±0.18 a    |
|       | N : Mg  | 6.41±0.64 b     | 7.28±0.92 ab   | 9.71±1.32 a    |
|       | Ca : Mg | 4.45±0.55 b     | 6.47±0.7 a     | 6.23±0.67 ab   |
| 落叶乔木  | C : N   | 24.69±0.29 a    | 28.85±4.13 a   | 26.08±2.13 a   |
|       | C : P   | 363.45±32.15 b  | 515.99±59.71 a | 365.23±26.77 b |
|       | N : P   | 14.68±1.13 a    | 18.99±1.91 a   | 14.71±2.16 a   |
|       | C : Ca  | 24.89±4.44 a    | 34.66±8.08 a   | 32.39±3.63 a   |
|       | C : Mg  | 156.49±61.2 a   | 160.38±36.85 a | 189.18±16.23 a |
|       | N : Ca  | 1.00±0.17 a     | 1.22±0.21 a    | 1.24±0.10 a    |
|       | N : Mg  | 6.25±2.41 a     | 5.59±0.96 a    | 7.24±0.15 a    |
|       | Ca : Mg | 5.5±1.48 a      | 4.9±0.97 a     | 5.97±0.37 a    |
| 常绿灌木  | C : N   | 25.47±1.89 b    | 28.65±1.8 ab   | 31.99±1.58 a   |
|       | C : P   | 439.58±28.5 a   | 442.42±39.75 a | 496.05±29.73 a |
|       | N : P   | 17.46±0.83 a    | 15.73±1.2 a    | 15.65±0.76 a   |
|       | C : Ca  | 17.95±1.96 b    | 20.96±2.12 b   | 34.98±3.49 a   |
|       | C : Mg  | 129.28±23.97 a  | 168.4±29.55 a  | 189.13±17.29 a |
|       | N : Ca  | 0.73±0.09 a     | 0.82±0.11 a    | 1.14±0.13 a    |
|       | N : Mg  | 5.27±0.89 a     | 6.3±1.33 a     | 5.93±0.45 a    |
|       | Ca : Mg | 7.13±1.31 a     | 9.54±2.34 a    | 6.15±0.53 a    |
| 落叶灌木  | C : N   | 27.16±1.36 ab   | 25.55±0.92 b   | 29±1.29 a      |
|       | C : P   | 451.23±25.35 a  | 433.72±16.94 a | 427.87±22.85 a |
|       | N : P   | 16.99±1.01 ab   | 17.56±0.66 a   | 15.05±0.67 b   |
|       | C : Ca  | 25.32±6.9 a     | 23.39±1.63 a   | 29.57±2.28 a   |
|       | C : Mg  | 171.84±35.33 ab | 165.01±9.24 b  | 215.2±15.55 a  |
|       | N : Ca  | 0.91±0.21 a     | 0.99±0.09 a    | 1.11±0.11 a    |
|       | N : Mg  | 6.5±1.27 a      | 6.99±0.52 a    | 7.96±0.72 a    |
|       | Ca : Mg | 8.01±0.89 a     | 8.92±0.89 a    | 8.37±0.79 a    |
| 草本植物  | C : N   | 22.11±2.47 a    | 25.67±2.36 a   | 31.79±2.75 a   |
|       | C : P   | 448.27±67.82 a  | 391.21±50.9 a  | 453.5±46.11 a  |
|       | N : P   | 20.46±2.81 a    | 15.07±0.97 b   | 14.45±0.67 b   |
|       | C : Ca  | 48.28±11.78 a   | 32.41±5.29 a   | 52.47±7.67 a   |
|       | C : Mg  | 213.81±48.56 a  | 206.98±46.49 a | 214.54±33.31 a |
|       | N : Ca  | 2.2±0.47 a      | 1.25±0.16 b    | 1.54±0.15 ab   |
|       | N : Mg  | 9.15±1.58 a     | 7.35±0.90 a    | 6.5±0.77 a     |
|       | Ca : Mg | 4.89±0.81 ab    | 6.9±0.81 a     | 4.26±0.32 b    |

注:不同小写字母表示同一元素不同群落之间差异显著( $P\leqslant 0.05$ )。

表7 蒙自喀斯特断陷盆地植物元素含量相关性

Table 7 Correlation between element contents of plants in karst fault basin of Mengzi

| 元素 | C        | N       | P       | K       | Ca       | Mg      | Na      | Fe      | Al      | Cu      | Zn    |
|----|----------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|
| N  | 0.166**  |         |         |         |          |         |         |         |         |         |       |
| P  | 0.039    | 0.539** |         |         |          |         |         |         |         |         |       |
| K  | -0.235** | 0.307** | 0.302** |         |          |         |         |         |         |         |       |
| Ca | -0.418** | 0.040   | 0.058   | 0.311   |          |         |         |         |         |         |       |
| Mg | -0.317** | 0.135*  | 0.115   | 0.192** | 0.543**  |         |         |         |         |         |       |
| Na | -0.008   | 0.137*  | 0.135*  | 0.298** | 0.041    | 0.104   |         |         |         |         |       |
| Fe | -0.066   | 0.074   | 0.000   | 0.049   | -0.074   | -0.027  | -0.008  |         |         |         |       |
| Al | -0.119*  | 0.118*  | 0.009   | 0.049   | -0.007   | 0.156** | 0.041   | 0.427** |         |         |       |
| Cu | -0.003   | 0.082   | 0.172** | 0.069   | -0.192** | -0.084  | -0.010  | 0.285** | 0.137*  |         |       |
| Zn | 0.080    | 0.097   | 0.277** | 0.226** | -0.053   | -0.054  | 0.254** | 0.007   | -0.008  | 0.438** |       |
| Mn | 0.066    | 0.064   | 0.079   | -0.068  | -0.080   | 0.016   | 0.006   | 0.132*  | 0.261** | -0.005  | 0.006 |

注: \*表示显著相关( $p \leq 0.05$ ), \*\*表示极显著相关( $P \leq 0.01$ )

于16,植物生长受到P含量的限制,而草地群落内N:P比值在14至16之间,生长受到N与P单独或共同的影响。本研究与勾昕<sup>[23]</sup>所得的贵州喀斯特地区贵阳市乌当区马尾松林、灌丛、草丛N:P比值均小于14的结果截然不同,植被生长受P含量的制约更大。此外,三种不同群落中植物的C:N、N:P、C:Ca、C:Mg、Ca:Mg存在着显著差异。草地群落内植物的C:N、C:Ca、C:Mg有更高的值,N:P则显著低于其它两种群落,灌丛群落中Ca:Mg显著高于天然林和草地。植物元素含量间的这种化学计量比值变化关系体现了植物为适应喀斯特石漠化的特殊环境而具备的元素平衡的能力<sup>[24-25]</sup>。

研究区植物12种元素间,有27对元素相关性显著,占总元素对的40.9%,具有相关关系的元素比例高于贵州喀斯特地区和茂兰喀斯特森林<sup>[14, 22]</sup>。其中,具有极显著相关关系的有20对( $P \leq 0.01$ ),显著相关关系的有7对( $P \leq 0.05$ )。多种元素间存在着相当比例的相关关系,说明植物内这些元素之间具有较强的比例组成和协调关系。

#### 4 结 论

本研究调查了喀斯特断陷盆地内植物叶片的C、N、P、K、Ca、Mg、Na、Fe、Al、Cu、Zn、Mn元素含量,在植物种、功能型和群落水平上,分析了化学计量学组成特点。结果表明:不同群落内植物元素含量存在差异,其中N、K、Ca、Mg、Al、Cu、Zn、Mn差异显著;在不同群落内,不同功能型植物叶片元素含量呈现差异

变化,植物生长限制性元素各有不同,而且化学计量比值存在显著差异。研究结果揭示出为适应生长环境的变化,植物采取不同的化学计量学方法。

#### 参考文献

- [1] 包维楷, 陈庆恒. 生态系统退化的过程及其特点[J]. 生态学杂志, 1999, 18(2): 37-43.
- [2] 甘露. 人类活动与喀斯特生态系统相关作用初探[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版) 1998, 16(1): 50-54.
- [3] Chapin F S, Matson P A, Mooney H A. 陆地生态系统生态学原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [4] Reich M, Aghajanzadeh T, De Kok L J. Physiological basis of plant nutrient use efficiency-concepts, opportunities and challenges for its improvement, In: Hawkesford M J, Kopriva S, De Kok, L J (Eds.). Nutrient use efficiency in plants: concepts and approaches [M]. Springer International Publishing, 2014:1-27.
- [5] 林植芳, 阿勒. 鼎湖山亚热带地区植物的叶片矿质元素[J]. 生态学报, 1989, 9(4): 320-324.
- [6] Pei J, Wang L, Wang X, et al. Time series of landsat imagery shows vegetation recovery in two fragile karst watersheds in southwest China from 1988 to 2016 [J]. Remote Sensing, 2019, 11: 2044.
- [7] 沈有信, 江洁, 陈胜国, 等. 滇东喀斯特山地植被退化及其恢复对策[J]. 山地学报, 2005, 23(4): 4425-4430.
- [8] 覃弦, 龙翠玲. 茂兰喀斯特森林不同演替阶段优势乔木种群结构与分布格局[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2016, 34(6): 33-38.
- [9] 刘占民. 喀斯特石灰土—灌丛系统主要养分含量分布特征研究[D]. 贵阳: 中国科学院研究生院(地球化学研究所), 2006.
- [10] 周晓东. 基于GIS的云南小江流域植被生态需水量时空分布

- 规律[D]. 北京:中国地质科学院, 2017.
- [11] 郭柯, 刘长成, 董鸣. 我国西南喀斯特植物生态适应性与石漠化治理[J]. 植物生态学报, 2011, 35(10): 991-999.
- [12] 姚永慧. 中国西南喀斯特石漠化研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2014, 33(1): 76-84.
- [13] 刘宏伟. 两种不同生态系统中植物叶片功能性状及养分再吸收比较研究[D]. 重庆:西南大学, 2014.
- [14] 杨成, 刘丛强, 宋照亮, 等. 贵州喀斯特山区植物营养元素含量特征[J]. 生态环境学报, 2007, 16(2): 503-508.
- [15] 周运超. 贵州喀斯特植被主要营养元素含量分析[J]. 山地农业生物学报, 1997, 16(1): 11-16.
- [16] 蒋裕良. 弄岗喀斯特森林树种元素含量特征及其与生境的联系[D]. 桂林:广西师范大学, 2016.
- [17] Tilman D, Wedin D. Plant traits and resource reduction for five grasses growing on a nitrogen gradient [J]. Ecology, 1991, 72(2): 685-700.
- [18] 李雄, 徐迪民, 赵由才, 等. 生活垃圾填埋场封场后种植植物中重金属迁移研究[J]. 环境污染与防治, 2006, 28(9): 641-643, 670.
- [19] 旷远文, 温达志, 闫俊华, 等. 贵州普定喀斯特森林 3 种优势树种叶片元素含量特征[J]. 应用与环境生物学报, 2010, 16(2): 158-163.
- [20] Grubb P J, Edwards P J. Studies of mineral cycling in a Montane rain forest in New Guinea; III. the distribution of mineral elements in the above-ground material[J]. Journal of Ecology, 1982, 70(2): 623-648.
- [21] 盛茂银, 熊康宁, 崔高仰, 等. 贵州喀斯特石漠化地区植物多样性与土壤理化性质[J]. 生态学报, 2015, 35(2): 434-448.
- [22] 罗绪强, 张桂玲, 杜雪莲, 等. 茂兰喀斯特森林常见钙生植物叶片元素含量及其化学计量学特征[J]. 生态环境学报, 2014, 23(7): 1121-1129.
- [23] 勾昕. 喀斯特地区不同演替阶段植物群落叶片化学计量特征[J]. 福建农业, 2015(5): 126-127.
- [24] 俞月凤, 彭晚霞, 宋同清, 等. 喀斯特峰丛洼地不同森林类型植物和土壤 C、N、P 化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2014, 25(4): 947-954.
- [25] 梁晓. 云南鹤庆县石漠化地区典型植物生理生态适应性研究[D]. 桂林:广西师范大学, 2014.

## Characteristics of leaf ecological stoichiometry in typical plant communities in karst fault-depression basins of Yunnan Province

CHEN Kehao, DU Hongmei, LIU Chunjiang

(School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract** Plant community composition, elemental content of plants and stoichiometric characteristics are strongly influenced by geological chemistry, climate and human activities in karst areas. This study is concerned with plants sampled in the natural forest, shrub and grassland communities in a karst fault-depression basin, Mengzi, Yunnan. The purpose is to clarify the content of 12 elements and stoichiometric ratios in leaves of this area. The results show that elemental concentrations of leaves are of an order  $C > Ca > N > K > Mg > P > Fe > Al > Zn > Mn > Na > Cu$ , with significant differences in N, K, Ca, Mg, Al, Cu, Zn and Mn concentrations for plants among three communities. P content limits growth of plants in natural forest and shrub communities, and N and P contents separately or jointly affect growth of plants in grassland communities. In grassland communities, ratios  $C : N$ ,  $C : Ca$  and  $C : Mg$  of plants are significantly higher, while  $N : P$  ratio lower than those in the natural forest and shrub communities. The  $C : Ca$  ratio of plants significantly differs among the three communities, with the order of grasslands  $>$  natural forests  $>$  shrubs. In statistics, 27 pairs of elements (40.9 % of total element pairs) display significant correlations. The results suggest that plants have formed unique ecological stoichiometric traits to adapt for local environmental conditions in karst fault-depression basins of Yunnan.

**Key words** karst, fault basin, plant communities, elements, ecological stoichiometry

(编辑 张玲)