

文章编号: 1008-2786-(2015)1-16-09

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000003

# 石林 3 种喀斯特生态系统的石面有机质和养分含量

王电杰<sup>1 2</sup> 沈有信<sup>1\*</sup> 黄金<sup>3</sup>

(1. 中国科学院西双版纳热带植物园, 云南 昆明 650000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 石林风景名胜区管理局, 云南 石林 652211)

**摘 要:** 通过实地取样和检测, 研究了云南石林三类喀斯特生态系统中岩石附着物的有机质和养分含量及其环境影响因子。结果表明: 1. 石漠化生态系统的石面气象因子与次生林生态系统间差异显著, 人工林生态系统介于二者之间; 2. 石漠化生态系统每平方米石表面上的平均有机质、氮、磷、钾含量分别为  $7.65 \pm 0.74$  g,  $0.45 \pm 0.04$  g,  $0.029 \pm 0.003$  g 和  $0.07 \pm 0.006$  g; 人工林生态系统中分别为  $48.38 \pm 9.19$  g,  $2.02 \pm 0.32$  g,  $0.12 \pm 0.021$  g 和  $0.85 \pm 0.167$  g; 次生林生态系统中分别为  $92.21 \pm 19.72$  g,  $4.44 \pm 0.94$  g,  $0.4 \pm 0.074$  g 和  $0.59 \pm 0.104$  g。每平方米石表面上的平均有机质、氮、磷、钾含量均表现为次生林生态系统 > 人工林生态系统 > 石漠化生态系统; 3. 附着物碳酸钙含量、附着物含水量、石表面最低空气湿度显著影响附着物有机质含量。因此, 南方喀斯特的不同生态系统, 即使是已经石漠化的生态系统, 其石面上存在着一定数量的有机物和养分蓄积, 蓄积量的高低会受到各种气象因子和基质等的影响。

**关键词:** 喀斯特; 小气候; 岩石附着物; 有机质; 氮磷钾

**中图分类号:** P642.25 Q142

**文献标志码:** A

岩石表面生长着各种隐花植物和微生物<sup>[1]</sup>, 其养分生产、汇集作用受到关注。据 Elbert<sup>[1]</sup> 推算, 全球的各种结皮和树体表面生长的隐花植物每年吸收 3.9 Pg 碳, 相当于陆地植被 7% 的净初级生产量; 吸收氮 49 Tg, 相当于陆地生物固氮量的一半。但该估算中未包括各种石体上生长的隐花植物生产力。资料<sup>[2-4]</sup> 和野外观察表明, 我国西南喀斯特地区出露的碳酸盐岩上也普遍附着各种隐花植物和微生物。

由于喀斯特作用, 西南地区广布土壤间断分布格局的生态系统<sup>[5]</sup>。地表上岩石占据大量空间会影响系统生产力, 但这些客观存在的岩石也存在积极作用。从已有的研究看, 岩石表面能固着一定的大气干湿沉降<sup>[2]</sup>; 石面上隐花植物的生长能固定碳氮元素<sup>[6-8]</sup>, 形成一定的生物量, 可看成是喀斯特生

态系统中具有生产力的亚系统。岩石表面上的这些附着物, 大部分会随水流或自然掉落进入土壤, 影响土壤上的植物群落<sup>[9-11]</sup>。喀斯特地区面积约占全球陆地面积的 12%, 中国的碳酸盐岩出露面积为  $90.7 \times 10^4$  km<sup>2</sup><sup>[12]</sup>, 但少有人关注石面亚系统的附着物及其生态影响。本研究选择云南石林的石漠化生态系统、人工林生态系统和次生林生态系统, 采集碳酸盐岩表面的附着物并检测其有机质和养分含量, 探寻系统间的变化规律及其影响因子, 为喀斯特生态系统的管理提供新的参考视角。

## 1 研究地点概况

石林县属亚热带低纬度高原山地季风气候, 夏

收稿日期(Received date): 2014-05-12; 修回日期(Accepted): 2014-09-15。

基金项目(Foundation item): 中国科学院西部之光项目(07ZK101K02) 资助。[Supported by West Light Foundation of The Chinese Academy of Sciences(07ZK101K02).]

作者简介(Biography): 王电杰(1988-), 河南新乡人, 硕士研究生, 从事碳酸盐岩附着物研究。[Wang Dianjie(1988-), Born in Xinxiang of Henan Province, postgraduate, engaged in carbonate rock epiliths research.] E-mail: ecorst@163.com

\* 通信作者(Corresponding author): 沈有信 [Shen Youxin] E-mail: yxshen@xtbg.ac.cn

秋半年为雨季( 每年 5—10 月) ,冬春半年为旱季( 11 月至次年 4 月) 。历年平均日照时数 2 318 h ,日照率 53% ,无霜期 254 d。年均温 14.8℃ ,年降水量 850 mm。地带性植被属“滇中、滇东高原半湿润常绿阔叶林、云南松林区”<sup>[13]</sup>。选择 3 类生态系统进行对比:

1. 石漠化生态系统: 位于石林风景区范围内。当地农民砍伐了乔灌木, 偶见低矮植物如绣线菊( *Spiraea salicifolia*) 、鬼针草( *Bidens pilosa*) 、苦刺花( *Sophora viciifolia*) 植被高度低于样地内大部分石头。地势相对平坦, 岩石出露面积占比 75%。岩石表面着生蓝藻。

2. 人工林植被生态系统: 位于石林风景区范围内。2005 年清除原生植被, 种植了云南松( *Pinus yunnanensis*) 、红叶石楠( *Photinia × fraseri*) 、火棘( *Pyracantha fortuneana*) 、栎树( *Koelreuteria paniculata*) 等乔灌木幼树, 至今已高于大部分石头。树木间距较大, 林窗开阔, 林下空旷多杂草。样地坡向东北, 坡度 45°。岩石出露面积占比 50%。值得注意的是, 苗木种植前的土地整理使部分曾经埋藏的岩石下角出露, 岩石表面继承了土下溶蚀形成的松懈表层。岩石表面着生蓝藻, 颜色较石漠化生态系统为深。田友萍对石林风景区内的气生蓝藻进行过种类和群落调查<sup>[14-15]</sup>。

3. 次生半湿润常绿阔叶林生态系统: 位于石林风景区外围的保护区内, 以滇青冈( *Cyclobalanopsis glaucoides*) 、清香木( *Pistacia weinmannifolia*) 、团花新木姜子( *Neolitsea homilantha*) 、云南木樨榄( *Olea*

*yunnanensis*) 为优势物种, 混有黄连木( *Pistacia chinensis*) 、大毛毛花( *Albizia mollis*) 、云南鹅耳枥( *Carpinus mobeigiana*) 等落叶成份, 森林保存有相对原始的成分, 有一定的群落结构。具体植被情况参见文献[16]。样地坡向东北, 坡度 45°, 岩石出露面积占比 80%, 石面上着生苔藓和部分高等维管植物, 徐海清<sup>[17]</sup>在同一地点完成岩石和树木上的附生物种类调查。

2 研究材料与方法

2.1 石体选择及特征测量

2013-09-11—09-15, 在 3 类生态系统内各设置 100 m×100 m 样地, 于样地内随机各选 10 个石体, 3 个样地共计 30 个石体。

测量岩石高度; 目测岩石上方的林冠盖度; 用指南针判断样面的朝向; 用 JZC-B2 型便携式坡度仪测量样点岩石取样表面的坡度; 用轮廓仪于岩石上部和下部朝向地面各取 3 条 25 cm 长轮廓线, 以过取样长度线  $L_n$  和轮廓线最深谷底的两切线向最高点作垂线, 垂线长度为  $R_y$ , 依据公式  $JRC = 400 \cdot \frac{R_y}{L_n}$  求取  $JRC$ , 每个石体的 6 条线的平均  $JRC$  作为岩石表面的粗糙度值。轮廓仪的操作和计算方法参见文献[18-19]。各样地的岩石特征值见表 1。除了岩石上方林冠盖度在三个系统间差异显著外, 岩石高度、石面坡度、石表面粗糙度在三个系统间差异不显著。取样岩石表面朝向为随机选择结果。

表 1 不同生态系统内的取样石体特征  
Table 1 General features of sampling rocks among three ecosystems

| 样本情况<br>Sample case                              | 均值 ± 标准误 Mean ± standard error              |   |  |
|--|---|---|--|
|  | 石漠化生态系统<br>Stony desertification ecosystems | 人工林生态系统<br>Manmade forest ecosystems                                  | 次生林生态系统<br>Secondary forest ecosystems                   |
| 岩石高度 Rock height/cm                              | 123.05 ± 7.03a                              | 123.3 ± 10.04a  | 164.7 ± 15.50a   |
| 石面坡度 Rock Slope                                  | 66.44 ± 3.1a                                | 73.9 ± 3.63a  | 73.65 ± 2.53a  |
| 岩石表面粗糙度 Rock roughness                           | 26.64 ± 2.54a                               | 26.64 ± 2.54a   | 30.17 ± 2.65a  |
| 岩石上方林冠盖度 Canopy coverage above rock/%            | 0 ± 0c                                      | 18.6 ± 9.2b   | 50.7 ± 12.5a   |
| 取样岩石表面朝向<br>Orientation of Sampling rock surface | 东北 NE(4) 东南 SE(3) 西<br>南 SW(2) 西北 NW(1)     | 东 E(2) 西北 NW(2) 东南 SE(1)<br>西南 SW(1) 东北 NE(1) 南 S(1) 西<br>W(1) 北 N(1) | 西北 NW(2) 东南 SE<br>(2) 东北 NE(2) 西南<br>SW(1) 北 N(1) 东 E(2) |

注: 数字后不同字母表示不同生态系统间差异达到显著性  $P < 0.05$ 。朝向括号里的数字代表此朝向的岩石取样面个数。  
Note: Different lowercase letters indicate significant differences between two systems ( $P < 0.05$ ). Numbers in brackets represent the amount of sampling rock surfaces in specific orientation.

## 2.2 附着物采样与检测

依据石体高度从中线处划分上部和下部,石面各放置 10 cm × 10 cm 的小框,用小刀将框内的附着物刮干净,移入自封袋,上下部样品混合代表一个岩石的表面附着物,编号,带回实验室处理。

样品称重,置于 80℃ 烘箱内 14 h 称重,计算含水量。将每个生态系统的 10 个附着物样品随机混合成三份,研碎过 0.25 mm 筛,检测全碳,全氮,全磷,全钾,有机质含量。附着物样品内混入了大量的碳酸盐岩风化物,参照森林土壤分析方法(中华人民共和国林业行业标准 LY/T 1210 ~ 1275 - 1999; 备案号: 3794 - 3859 - 1999; 国家林业局发布)分析样品。全碳使用碳氮分析仪(型号: Vario MAX CN)测定;全氮采用浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 消解,全自动凯氏定氮仪(型号: K370)凯氏定氮法测定(LY/T 1228 - 1999);有机质含量用硫酸、重铬酸钾氧化-外加热法测定(LY/T 1237 - 1999);全磷、全钾经 HClO<sub>4</sub> - HF 消解,全谱直读等离子体发射光谱仪 ICP - AES(型号: iCAP6300)测定(LY/T 1254 - 1999)。用全碳含量减去有机碳含量(有机质含量推算)得到无机碳含量。假定样品中无机碳全部来自碳酸盐岩基质及碳酸钙干沉降颗粒,依据 C 与 CaCO<sub>3</sub> 之间的关系计算附着物中的碳酸钙含量。各含量与干重的积除以取样面积获得单位岩石表面积的含量值。

## 2.3 气象因子测量

石林地处亚热带,其旱季(11月至次年4月)降水量仅占全年降水量的 12% ~ 20%,最冷月是 1 月,最强辐射值也出现在冬季<sup>[13]</sup>。此期间的温度、空气湿度和辐射等因子导致的系统间差异对石面生物的生产力的影响可能更大。

参考中国天气网(www.weather.com.cn) 2014 年 1 月初期多日的石林地区在线实时温湿度资料,选取凌晨 5 点的气温和石面温度作为测量当日最低温度值,中午 12 点的可见光辐射值作为最强辐射值。于 2014 年 1 月 15 日、16 日、18 日 3 个晴天分别测定 3 个生态系统内和系统外的日最低石表面气温、日最低石面温度、最强光辐射值;12 ~ 18 点整点的岩石表面气温、岩石表面空气湿度和石面温度,从中选择最高温度、最低空气湿度值。石表面温度用红外温度计监测,每个石头的上下各选固定的 3 点,以红外光发射口贴近石面读数,6 个点数值平均后作为一个石头表面的一次温度测量值;每一石体悬挂一个 272 - A 型干湿计,检测各时段的空气温湿

度;用光传感器(英国,Skype Instruments 公司)监测每个石体受到的光合有效辐射值。每个系统外无植被处设置 3 个对照岩石,同时测定各种温湿度值。

## 2.4 数据处理和统计分析

对各岩石的单位面积有机质含量、全氮、全钾、全磷含量,直接监测的气象数据和附着物碳酸钙含量、粗糙度、坡度数据进行正态性和方差齐性检验,若两者都满足则进行生态系统间的方差分析;不满足的通过数据转换,再进行上述过程;仍不满足的进行生态系统间 Kruskal - Wallis 检验和 Wilcoxon 秩检验。

我们的样地内的石体多低于 2 m,属于石牙。碳酸盐岩出露地表后受降水溶蚀的改造,多形成尖削的顶部<sup>[12]</sup>。根据其近似于锥状或楔状几何体的形态和已有的各石面的坡度数据,可以推算出其表面积和投影面积之间的关系,即

$$\frac{S_A}{S_B} = \frac{1}{\cos(k)} \text{ 或 } S_A \frac{S_B}{\cos(k)} \quad (1)$$

式中  $S_A$  指岩石表面积,  $S_B$  指岩石投影面积,  $k$  指的是坡度角。一定表面积与所对应的投影面积上的有机质和氮磷钾的量是相同的,所以

$$S_A \times D_A = S_B \times D_B \text{ 则 } D_B = \frac{D_A}{\cos(k)} \quad (2)$$

式中  $D_A$  指单位岩石表面积有机质或氮磷钾含量,  $D_B$  指单位岩石投影面积有机质或氮磷钾含量。各生态系统每公顷(10 000 m<sup>2</sup>) 土地的石面附着物有机质、氮、磷、钾数量

$$M_T = \overline{D_B} \times R \times 10000 \quad (3)$$

式中  $M_T$  指每公顷土地内的石面有机质或氮磷钾含量;  $\overline{D_B}$  为各系统内的  $D_B$  平均值( $n = 10$ );  $R$  指各系统内岩石出露面积占比。

将每一个岩石的光、温、湿指标减去其所在生态系统外的对照值再除以其对照值获得相对石表面最低气温、相对石表面最低温、相对石表面最高气温、相对石表面最高温、相对石表面最大气温差、相对石表面最大温差、相对石表面最强辐射、相对石表面最低空气湿度 8 个指标,其中的温差值是指最高温减去最低温的差值。将此 8 个指标与石面粗糙度、石面坡度、附着物碳酸钙含量、附着物含水量组成影响因子集(12 因子),数据标准化后进行主成分分析,进一步比较各生态系统的影响因子差异。将各样点有机质含量正态性转换后作为因变量与 12 个标准化后的影响因子自变量关联,逐步回归选元,进行残差正态性、线性、等方差性、多重共线性回归诊断,其

中的多重共线性的影响选择偏最小二乘回归分析<sup>[20]</sup>作对照。为保证分析结果的可靠性,最后再将回归结果与偏相关分析结果进行对比<sup>[21]</sup>。偏相关分析需要满足多元正态性前提,用主成分法实现多元正态性的检验<sup>[20]</sup>。在数据不符合要求时进行数据转换后完成以上相关分析。

使用 R3.0.3 进行所有的统计分析和作图。

3 结果与分析

3.1 不同生态系统的石面生态因子差异

次生林生态系统与石漠化生态系统间的各石面气象因子差异显著;人工林生态系统和石漠化生态系统间的石表面最低空气湿度、石表面最强辐射、石表面最高气温、石表面最大气温差、石表面最高温、石表面最大温差的差异不显著,附着物含水量在人

工林生态系统和次生林生态系统间没有显著差异;石表面最低气温、石表面低温和基质碳酸钙含量在 3 个系统间均有显著差异。

对 12 个环境因子进行主成分分析,获得 4 个主成分,其累积方差贡献率为 86.1%。主成分 1 主要由辐射、温度、湿度、含水量等变量解释,可称为光、温、湿成分,方差贡献率为 53.5%。主成分 2 主要由单位面积附着物碳酸钙含量解释,是为基质成分,方差贡献率为 15.3%。主成分 3 主要由石面坡度解释,方差贡献率 9.2%。主成分 4 主要由石面粗糙度解释,方差贡献率 8.1%。后两者方差贡献率较低,且各系统样点分布没有明显规律。

依据主成分 1 和 2 作平面图(图 1),能完全区分开 3 个系统的样地。石漠化样地的样点集中分布在图的左下角,测量日的相对石表面最低温和相对石表面最低气温最低、相对石表面最高温和相对石

表 2 3 个生态系统各测量日石面生态因子的比较

Table 2 Comparison of ecological factors on rock surface among three ecosystems

| 生态因子<br>Ecological factors  | 均值 ± 标准误 Mean ± standard error              |                                      |  |
|---|---|--------------------------------------|--|
|   | 石漠化生态系统<br>Stony desertification ecosystems | 人工林生态系统<br>Manmade forest ecosystems | 次生林生态系统<br>Secondary forest ecosystems |
| 石表面最低空气湿度<br>Lowest air humidity above rock surface/%                 | 49.7 ± 2.7b                                 | 58.4 ± 5.9b                          | 80.6 ± 1.5a                            |
| 石表面最强辐射<br>Highest radiation on rock surface/(mol/m <sup>2</sup> /s)  | 95.3 ± 15.7a                                | 71.6 ± 18.9a                         | 15.18 ± 7.1b                           |
| 石表面最高气温<br>Highest air temperature above rock surface/℃               | 16.8 ± 0.8a                                 | 16.1 ± 1.4a                          | 7.2 ± 0.5b                             |
| 石表面最低气温<br>Lowest air temperature above rock surface/℃                | 5.6 ± 0.1a                                  | 3.6 ± 0.3b                           | 1.9 ± 0.1c                             |
| 石表面最大气温差<br>Biggest air temperature difference above rock surface/℃   | 11.2 ± 0.8a                                 | 12.6 ± 1.4a                          | 5.3 ± 0.5b                             |
| 石表面最高温<br>Highest temperature on rock surface/℃                       | 17.9 ± 1.4a                                 | 16.1 ± 1.8a                          | 6.0 ± 0.6b                             |
| 石表面最低温<br>Lowest temperature on rock surface/℃                        | 8.3 ± 0.2a                                  | 4.2 ± 0.2b                           | 3.2 ± 0.2c                             |
| 石表面最大温差<br>Biggest temperature difference on rock surface/℃           | 8.3 ± 0.2a                                  | 4.6 ± 0.5a                           | 3.3 ± 0.2b                             |
| 附着物含水量<br>Water content of epiliths/%                                 | 1.6 ± 0.1b                                  | 14 ± 2a                              | 22 ± 3.9a                              |
| 附着物碳酸钙含量<br>Calcium carbonate content of epiliths/(g/m <sup>2</sup> ) | 43.1 ± 4c                                   | 1 217.8 ± 191.2a                     | 199.57 ± 70.4b                         |

注: 数字后不同字母表示不同生态系统间差异达到显著性  $P < 0.05$ 。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between two systems ( $P < 0.05$ ).

表面最高气温最高、相对石表面最大温差和相对石表面最大气温差最大、相对石表面最强辐射最高、相对石表面最低空气湿度最低,附着物碳酸钙含量低。人工林样地的样点集中在图中上部,测量日的相对石表面最低温和相对石表面最低气温、相对石表面最高温和相对石表面最高气温、相对石表面最大温差和相对石表面最大气温差、相对石表面最强辐射、相对石表面最低空气湿度都表现居中水平,附着物碳酸钙含量最高。次生林样地的样点集中在图右下角,测量日的相对石表面最低温和相对石表面最低气温最高、相对石表面最高温和相对石表面最高气温最低、相对石表面最大温差和相对石表面最大气温差最小、相对石表面最强辐射最低、相对石表面最低空气湿度最高,附着物碳酸钙含量居中。

### 3.2 不同生态系统的石面附着物有机质和养分含量

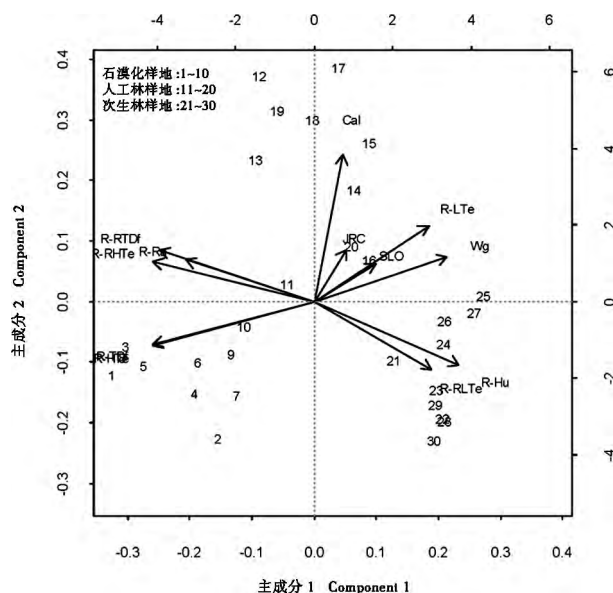
石漠化生态系统每平方米石表面上的有机质 ( $7.65 \pm 0.74$  g) 低于人工林生态系统 ( $48.38 \pm 9.19$  g), 人工林生态系统低于次生林生态系统 ( $92.21 \pm 19.72$  g), 差异均达到显著水平 [图 2(a)]; 石漠化生态系统每平方米石表面上的氮 ( $0.45 \pm 0.04$  g)、磷 ( $0.029 \pm 0.003$  g) 含量均低于人工林生态系统 (分别为  $2.02 \pm 0.32$  g 和  $0.12 \pm 0.021$  g), 人工林生态系统低于次生林生态系统 (分别为  $4.44 \pm 0.94$  g 和  $0.4 \pm 0.074$  g), 差异均达到显著水平 [图 2(b) 2(c)]; 石漠化生态系统每平方米石表面上的钾含量 ( $0.07 \pm 0.006$  g) 低于人工林生态系统 ( $0.85 \pm 0.167$  g), 差异显著, 次生林生态系统的钾含量 ( $0.59 \pm 0.104$  g) 略低于人工林生态系统 ( $0.85 \pm 0.167$  g), 但差异不显著 [图 2(d)]。

根据各生态系统内岩石出露面积占比和各石面的坡度折算, 石漠化生态系统每公顷的平均有机质、氮、磷、钾分别为  $163.0 \pm 21$  kg,  $9.7 \pm 1.3$  kg,  $0.6 \pm 0.08$  kg 和  $1.4 \pm 0.2$  kg; 人工林生态系统中分别为  $1303.2 \pm 396.4$  kg,  $55.4 \pm 16.2$  kg,  $3.2 \pm 0.9$  kg 和  $22.9 \pm 7.1$  kg; 次生林生态系统中分别为  $3290.5 \pm 882.5$  kg,  $158.8 \pm 43.6$  kg,  $14.7 \pm 4.4$  g 和  $21.7 \pm 6.2$  kg。

石漠化生态系统、人工林生态系统、次生林生态系统的每平方米岩石表面积附着物平均有机质含量比为 1: 6.3: 12.1, 平均氮含量比为 1: 4.5: 9.9, 平均磷含量比为 1: 4.1: 13.8, 平均钾含量比为 1: 12.1: 8.4。

### 3.3 石面有机质含量与影响因子之间的关系

逐步回归, 偏最小二乘回归, 偏相关三种分析结



$R-Hu, R-Ra, R-HTe, R-LTe, R-TDf, R-RHTe, R-RLTe, R-RTDf, JRC, SLO, Cal, Wg$  分别指相对石表面最低空气湿度、相对石表面最强辐射、相对石表面最高气温、相对石表面最低气温、相对石表面最大气温差、相对石表面最高温、相对石表面最低温、相对石表面最大温差、石面粗糙度、石面坡度、附着物碳酸钙含量、附着物含水量。 ( $R-Hu, R-Ra, R-HTe, R-LTe, R-TDf, R-RHTe, R-RLTe, R-RTDf, JRC, SLO, Cal, Wg$  represent Relative Lowest air humidity above rock surface, Relative highest radiation on rock surface, Relative highest air temperature above rock surface, Relative lowest air temperature above rock surface, Relative largest air temperature difference above rock surface, Relative highest temperature on rock surface, Relative lowest temperature on rock surface, Relative largest temperature difference on rock surface, Rock roughness, Rock slope, Calcium carbonate content of epiliths, Water content of epiliths, respectively.)

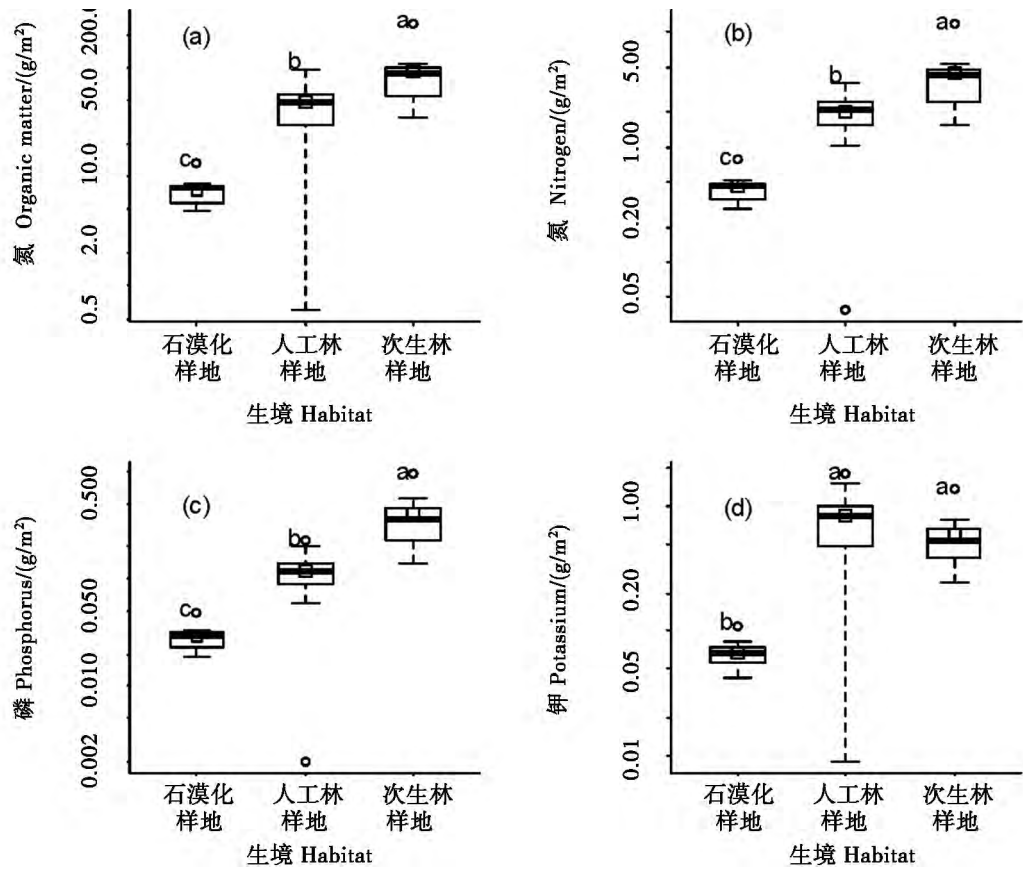
图 1 不同生态系统岩石表面附着物影响因子主成分

Fig. 1 Principal component analysis of impact factors to epiliths among three ecosystems

果一致表明, 相对石表面最低空气湿度, 附着物碳酸钙含量显著影响附着物有机质含量。附着物含水量分别通过了偏相关分析和逐步回归分析的系数显著性检验。相对石表面最低气温虽然通过了逐步回归的系数显著性检验, 但受多重共线性影响为负值, 不符合常理。所以附着物有机质含量对附着物碳酸钙含量、附着物含水量、相对石表面最低空气湿度三个因子比较敏感。

## 4 讨论

石林位于西南喀斯特地区, 气候温和, 降雨量充沛, 有较丰富的岩石生物种类。田友萍在石林景区记录到了计 4 目, 11 科, 31 属, 188 种碳酸盐岩蓝藻



不同字母表示差异达到显著  $P < 0.05$ 。虚线上下端直线代表 1.5 倍四分位数间距,超出此范围的圆为异常值点,箱体的顶部和底部分别代表上下四分位数,中间的粗线代表中位数,于中位数线处上下浮动的小方格代表平均值,Y 轴为 log 刻度。(different lowercase letters above the bar indicate significant difference between two ecosystems ( $P < 0.05$ ), the upper /lower end of the dashed line represent 1.5 fold the interquartile range, any point out of this range is outlier, the upper / lower part of the box represent the quartiles, the wider line in between represent median, the square swings on the median line represents mean value. Y axis is on logarithmic scale.)

图 2 不同生态系统石面附着物的有机质含量和养分含量

Fig. 2 Boxplot of organic matter contents and nutrient concentrations in epiliths among three ecosystems

表 3 显著影响石面有机质含量的因子 相关参数及其显著性水平

Table 3 Factors correlated with the organic matter contents of epiliths

| 岩面生态系统<br>Rock surface ecosystems                               | 逐步回归参数估计<br>Estimate | 偏最小二乘回归参数估计<br>Estimate | 偏相关系数<br>Partial correlation coefficient |
|---|----------------------|-------------------------|--|
| 截距<br>Intercept   | 5.270 ***            |                         |  |
| 相对石表面最低空气湿度<br>Relative Lowest air humidity above rock surface  | 1.829 ***            | 0.231 *                 | 0.745 ***                                |
| 相对石表面最低气温<br>Relative lowest air temperature above rock surface | -0.628 **            |                         |  |
| 附着物含水量<br>Water content of epiliths                             | 1.031 ***            | 0.800 •                 | 0.646 *                                  |
| 单位面积附着物碳酸钙含量<br>Calcium carbonate content of epiliths           | 1.602 ***            | 0.289 ***               | 0.883 ***                                |

注: • 表示  $P < 0.1$ ; \* 表示  $P < 0.05$ ; \*\* 表示  $P < 0.01$ ; \*\*\* 表示  $P < 0.001$ 。  
Note: • means  $P < 0.1$ ; \* means  $P < 0.05$ ; \*\* mean  $P < 0.01$ ; \*\*\* mean  $P < 0.001$ .

种类<sup>[14-15]</sup>。徐海清在石林半湿润常绿阔叶中发现石附生维管束植物 16 科 17 种,苔藓植物 3 种<sup>[17]</sup>。3 个生态系统的共计 30 个石体的附着物中都含有很高成分的有机物(图 2),即使是已经石漠化的生态系统内,石面上仍然存在这种蓄积,间接验证了这些石面附着物的存在。石面上覆植被改变会导致石面生物种类改变,Büdel<sup>[11]</sup>对热带不同生态系统的岛状山岩石隐花植物的生长面积进行调查后发现了类似的现象。在干旱萨王纳岛状山岩石上地衣与蓝藻的面积比值为 5:3,湿润萨王纳为 1:26,雨林中则少见地衣。我们的研究中,单位岩石表面积附着物的有机质、氮磷钾元素含量均呈现了次生林生态系统>人工林生态系统>石漠化生态系统的趋势。如果以石漠化系统为对照,次生林系统和人工林系统的有机质分别增加了 6.3 和 12.1 倍。虽然没有办法区分样品中石面隐花植物来源的有机物和其他来源有机质,但这种结果至少可反映出土壤植被群落对石面生物生长及其生态系统功能产生的重大影响。反过来说,地表植被的破坏严重影响了石面附着物的有机质和养分含量累积。因此可以说,石面生态亚系统与周围的土壤亚系统间存在着互惠互利的关系。

我们的研究结果显示,石林碳酸盐岩上单位投影面积的有机质含量为  $21.73 \pm 2.8 \text{ g/m}^2$  (石漠化生态系统),  $260.6 \pm 79.2 \text{ g/m}^2$  (次生林生态系统),  $411.25 \pm 110.31 \text{ g/m}^2$  (人工林生态系统)。若以有机质含量作为附着物生物量来对比同为喀斯特高原灰岩的意大利的石面生物,则后者依据单个物种推算石量生物量为  $30 \sim 594 \text{ g/m}^2$ <sup>[22]</sup>。高于我们各生态系统的结果。可能因为意大利灰岩沉积年龄较年轻(中生界碳酸盐岩),孔隙度大,有利于更多附着物着生。相比之下,中国大陆以古生界碳酸盐岩分布最广,成岩程度好,孔隙度小,岩性坚硬<sup>[12]</sup>。这也反映了我们选择附着物碳酸钙含量作为影响因子的意义所在。目前缺乏关于石面附着物养分含量(氮、磷、钾)的相关研究可供比较。

影响附着物的活性和分布的因子很多,如气象因子(包括降雨、湿度、温度、光强、风、大气污染);表面效应因子(如坡度、朝向、化学成分、持水性、吸热性、孔隙量),还有大气沉降,繁殖体距离等<sup>[23]</sup>。不同地域、不同生态系统受到的影响因子存在差异<sup>[24-27]</sup>。3 个生态系统的石面有机质和氮磷钾含量之间的差异与所测量的气象因子的差异比较吻

合,即各气象因子水平差的石漠化生态系统的石面有机质和氮磷钾含量最低(表 2、图 1、图 2),而各因子水平好的次生林生态系统的石面有机质和氮磷钾含量最高。逐步回归、偏最小二乘回归、偏相关三种分析方法相互印证的结果表明本研究的 12 个影响因子中,附着物碳酸钙含量、附着物含水量、石表面最低空气湿度是和附着物有机质含量独立相关的因子,也证明了基质和水分对石表面生物的重要性。温度、辐射两类因素与有机质含量之间的相关性未达到显著水平。推测是因为附着生物没有根系(附着非维管植物)或有根系但缺少土壤,水分极易丧失,在经常缺水的状况下,空气水分状况首先决定了附着物的生长和分布。当然,我们仅以附着物生长受限制季节的短期环境因子的系统差异来分析附着物有机质含量的系统差异之间的相关关系,也可能产生部分误差。

岩石表面的养分,通过风化剥落、雨水冲刷、食物链传递等方式向周围的土壤输出养分<sup>[9-11]</sup>,具有重要的生态学意义。如果把石面和土壤看成一个喀斯特生态系统的两个子系统,则岩石表面养分将是临近的喀斯特土壤子系统的潜在养分库。刘丛强对贵州西部强度石漠化、中度石漠化、非石漠化三类草地生态系统的土壤养分和有机质含量进行调查,发现土壤有机质,以及各形态氮素(酸水解性全氮和氨基酸态氮除外)的单位含量水平并没有随石漠化程度加深而降低,也推测岩石风化物补充是重要原因之一<sup>[28]</sup>。依据石面占比和石面坡度,计算得到的云南石林 3 个生态系统每公顷石面附着的有机质分别为  $163.0 \text{ kg}$ 、 $1303.2 \text{ kg}$ 、 $3290.5 \text{ kg}$ ,氮分别为  $9.7 \text{ kg}$ 、 $55.4$ 、 $158.8 \text{ kg}$ ,磷分别为  $0.6$ 、 $3.2$ 、 $14.7 \text{ kg}$ ,钾分别为  $1.4$ 、 $22.9$ 、 $21.7 \text{ kg}$ 。它们将是仅占地表面积 20% (次生林)、25% (石漠化)、50% (人工林) 的土壤的有机质和氮磷钾的有效补充。该研究没有区分不同生态系统间各石面隐花植物种类的生物量大小,还有石面附着物的非均匀分布状态,一定程度上影响了石面有机物和养分蓄积的评价精度和深度。

## 参考文献 (References)

- [1] Wolfgang Elbert, Bettina Weber, Susannah Burrows, et al. Contribution of cryptogamic covers to the global cycles of carbon and nitrogen [J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5(7): 459-462
- [2] Lian Bin. Microbial Roles in the genesis of soil from carbonate rock weathering [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2010, 29(001): 52-56 [连宾. 碳酸盐岩风化成土过程中的

- 微生物作用[J]. 矿物岩石地球化学通报 2010 29(1):52-56]
- [3] Cao Jianhua, Yuan Daoxian. Relationship between water-holding of carbonate rock and saxicolous algae, lichen and moss and its ecological significance [J]. *Geochimica*, 1999, 28(3):248-256[曹建华,袁道先. 石生藻类、地衣、苔藓与碳酸盐岩持水性及生态意义[J]. 地球化学, 1999 28(3):248-256]
- [4] Fu Lan, Zhang Zhaohui. A primary study on biokarst erosions of bryophytes in Guiyang City [J]. *Journal of Guizhou Normal University*, 2010, 28(4):140-143 [付兰, 张朝晖. 贵阳市苔藓植物的生物岩溶蚀初探[J]. 贵州师范大学学报 2010 28(4):140-143]
- [5] Yuan Daoxian, Cai Guihong. The science of karst environment [M]. Chongqing: Chongqing publishing house, 1988. [袁道先, 蔡桂鸿. 岩溶环境学[M]. 重庆: 重庆出版社, 1988.]
- [6] Robert A. Bell, Milton R. Sommerfeld. Algal biomass and primary production within a temperate zone sandstone [J]. *American journal of botany*, 1987, 74(2):294-297
- [7] Uta Matthes - Sears John A, Gerrath Douglas W Larson. Abundance, biomass, and productivity of endolithic and epilithic lower plants on the temperate-zone cliffs of the Niagara Escarpment, Canada [J]. *International Journal of Plant Sciences*, 1997, 158(4):451-460
- [8] E Imre Friedmann, Andrew P Kibler. Nitrogen economy of endolithic microbial communities in hot and cold deserts [J]. *Microbial ecology*, 1980, 6(2):95-108
- [9] Giora J Kidron, Avraham Starinsky. Chemical composition of dew and rain in an extreme desert (Negev): Cobbles serve as sink for nutrients [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 420:284-291
- [10] Yuki Chan, Donnabella C Lacap, Maggie C Y Lau, et al. Hypolithic microbial communities: between a rock and a hard place [J]. *Environmental Microbiology*, 2012, 14(9):2272-2282
- [11] Burkhard Büdel. Ecology and diversity of rock-inhabiting cyanobacteria in tropical regions [J]. *European Journal of Phycology*, 1999, 34(4):361-370
- [12] Yuan Daoxian, Zhu Dehao, Weng Jintao, et al. The karst science of China [M]. Beijing: Geological publishing house, 1993. [袁道先, 朱德浩, 翁金桃, 等. 中国岩溶学[M]. 北京: 地质出版社, 1993.]
- [13] Zhang Faming, Geng Hong, Li Yuhui, et al. Study on the Lunan stone forest karst, China [M]. Kunming: Yunnan science and technology press, 1997. [张发明, 耿弘, 李玉辉, 等. 中国路南石林喀斯特研究[M]. 昆明: 云南科技出版社, 1997.]
- [14] Tian Youping, Zhang Jie, Song Linhua, et al. A study on aerial cyanophyta (cyanobacteria) on the surface of carbonate rock in Yunnan Stone Forest, Yunnan Province, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(11):1793-2020 [田友萍, 张捷, 宋林华, 等. 云南石林碳酸盐岩表面气生蓝藻(蓝细菌)研究[J]. 生态学报 2002 22(11):1793-2020]
- [15] Tian Youping, Zhang Jie, Song Linhua, et al. A study on aerial algae communities on the surface of carbonate rock of the Yunnan stone forest [J]. *Carsologica sinica*, 2003, 22(3):203-211 [田友萍, 张捷, 宋林华, 等. 云南石林碳酸盐岩表面气生藻类群落的研究[J]. 中国岩溶 2003 22(3):203-211]
- [16] Shen Youxin, Liu Wenyao, Li Yuhui, et al. Community ecology study on Karst semi-humid evergreen broad-leaved forest at the central part of Yunnan [J]. *Guihaia*, 2005, 25(4):321-326 [沈有信, 刘文耀, 李玉辉, 等. 滇中喀斯特山地半湿润常绿阔叶林的群落生态学研究[J]. 广西植物 2005 25(4):321-326]
- [17] Xu Haiqing, Liu Wenyao, Shen Youxin, et al. A preliminary study of epiphytes in semi-humid evergreen broad-leaved forest in Stone forest, Karst Region, Yunnan Province [J]. *Guihaia*, 2006, 26(1):43-48 [徐海清, 刘文耀, 沈有信, 等. 云南石林喀斯特地区半湿润常绿阔叶林附生植物的初步研究[J]. 广西植物, 2006 26(1):43-48]
- [18] Du Shigui. Simple profile instrument and its application on studying joint roughness coefficient of rock [J], *Geological science and technology information*, 1992, 11(3):91-95 [杜世贵. 简易纵剖面仪及其在岩体结构面粗糙度系数研究中的应用[J], 1992, 11(3):91-95]
- [19] Hu Xiaofei, Du Shigui. Concise formula of barton's straight edge method for joint roughness coefficient [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2008, 16(2):196-200 [胡晓飞, 杜时贵. 结构面粗糙度系数 Barton 直边法的简明公式[J]. 工程地质学报 2008, 16(2):196-200]
- [20] Gao Huixuan. Multivariate statistical analysis [M]. Beijing: Beijing University Press. 2005. [高惠璇. 应用多元统计分析[M]. 北京: 北京大学出版社. 2005.]
- [21] Li Chunxi, Shao Yun, Jiang Lina. Biostatistics [M]. Beijing: Science Press. 2000. [李春喜, 邵云, 姜丽娜. 生物统计学[M]. 北京: 科学出版社. 2000.]
- [22] Tretiach M. Ecophysiology of calcicolous lichens: progress and problems [J]. *Giornale Botanico Italiano*, 1995, 129:159-184
- [23] Fabio Rindi. Diversity, distribution and ecology of green algae and cyanobacteria in urban habitats [G]//Joseph Seckbach, *Algae and Cyanobacteria in Extreme Environments*. Springer, 2007: 619-638
- [24] John P. McIlroy de la Rosa, Manuel Casares Porcel, Patricia A Warke. Mapping stone surface temperature fluctuations: Implications for lichen distribution and biomodification on historic stone surfaces [J]. *Journal of Cultural Heritage*. 2012, 14:346-353
- [25] N Häubner, R Schumann, U Karsten. Aeroterrestrial microalgae growing in biofilms on facades-response to temperature and water stress [J]. *Microbial ecology*, 2006, 51(3):285-293
- [26] P Tiano, P Accolla, L Tomaselli. Phototrophic biodeteriogens on lithoid surfaces: an ecological study [J]. *Microbial ecology*, 1995, 29(3):299-309
- [27] Heather Viles. Ecological perspectives on rock surface weathering: towards a conceptual model [J]. *Geomorphology*. 1995, 13(1):21-35
- [28] Liu Congqiang, et al. Biogeochemical processes and cycling of nutrients in the earth's surface: Cycling of nutrients in soil-plant systems of karstic environment, southwest China [M]. Beijing, Science Press, 2009. [刘丛强, 等. 生物地球化学过程与地表物质循环: 西南喀斯特土壤-植被系统生源要素循环[M]. 北京: 科学出版社. 2009.]



## Epilithic Organic Matter and Nutrient Contents in Three Different Karst Ecosystems

WANG Dianjie SHEN Youxin HUANG Jin

(1. Xishuangbanna Tropical Botanical Garden of Chinese Academy of Sciences Kunming 650000 China;

2. University of the Chinese Academy of Sciences Beijing 100049 China;

3. Stone Forest Scenic Area Administration Shilin 652211 Yunnan China)

**Abstract:** Researches from different ecosystems about rock as a potential nutrient sink existed. Yet, little is available about the quantity of the sink in a Karst ecosystem, a typical landscape of rock outcrops. Organic matter and major nutrient contents of epiliths on the carbonate rocks located in three different karst ecosystems and some relevant factors were studied by a pilot study. The results showed that: (1) The meteorological factor differences between stony desertification ecosystem and secondary forest ecosystem are significant, manmade forest ecosystem shows a transitional feature in between; (2) With  $7.65 \pm 0.74$  g organic matter,  $0.45 \pm 0.04$  g nitrogen,  $0.029 \pm 0.003$  g phosphorus,  $0.07 \pm 0.006$  g potassium per square meter rock surface in stony desertification ecosystem;  $48.38 \pm 9.19$  g organic matter,  $2.02 \pm 0.32$  g nitrogen,  $0.12 \pm 0.021$  g phosphorus,  $0.85 \pm 0.167$  g potassium per square meter rock surface in manmade forest ecosystem;  $92.21 \pm 19.72$  g organic matter,  $4.44 \pm 0.94$  g nitrogen,  $0.4 \pm 0.074$  g phosphorus,  $0.59 \pm 0.104$  g potassium per square meter rock surface in secondary forest ecosystem. All of those values followed an increasing order from stony desertification ecosystem, to manmade forest ecosystem, and then secondary forest ecosystem; (3) Relative Lowest air humidity above rock surface, water content and calcium carbonate content of epiliths are significant factors affecting organic matter content of epiliths. It revealed that, carbonate rock in southern China function as an organic matter and nutrient pool, even in oligotrophic stony desertification ecosystem. Apparently, the quantity of the pool is determined by some meteorological factors and substrate factors.

**Key words:** Karst; microclimate; epiliths; organic matter; nitrogen; phosphorous; potassium