

DOI: 10.20103/j.stxb.202309161997

赵梓贤,代奉林,刘杨赞,黎泽玉,黄永文,陈芳清.灌丛群落叶功能型及其与凋落物水分涵养性能的关系——以广西三种典型灌丛群落为例.生态学报,2024,44(13):5684-5694.

Zhao Z X, Dai F L, Liu Y Y, Li Z Y, Huang Y W, Chen F Q. Leaf functional types of shrub communities and their relationship with water conservation of litter: a case study of three typical shrub communities in Guangxi. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(13): 5684-5694.

## 灌丛群落叶功能型及其与凋落物水分涵养性能的关系 ——以广西三种典型灌丛群落为例

赵梓贤<sup>1</sup>, 代奉林<sup>1</sup>, 刘杨赞<sup>2</sup>, 黎泽玉<sup>3</sup>, 黄永文<sup>2</sup>, 陈芳清<sup>1,\*</sup>

1 湖北省三峡地区生态保护与治理国际联合研究中心, 宜昌 443000

2 湖北正江环保科技有限公司, 宜昌 443000

3 宜昌市生态环境局, 宜昌 443000

**摘要:** 牡荆、红背山麻杆和羊蹄甲群落是三种在广西壮族自治区具有较为重要水土保持功能的典型灌丛。通过野外勘察选择了受干扰程度较低的群落作为研究样地。通过测定样方中优势物种的叶功能性状和凋落物的水分涵养特征,揭示了灌丛群落的叶功能型及其与凋落物水分涵养性能的关系,以求更好地发挥灌丛在区域退化生态系统中生态恢复和水土保持的作用。研究结果表明,(1)三种灌丛群落的叶功能性状有着十分明显的差异,群落的叶功能型因此而分化形成了以羊蹄甲为代表的低干物质、低有机质与高比叶面积(低 LOMC+LDMC-高 SLA)的类型,以及以红背山麻杆群落和牡荆灌丛群落为代表的高干物质、高有机质与低比叶面积(高 LDMC+LOMC-低 SLA)的类型。后者因叶片磷含量(LPC)的不同,再进一步分化。(2)三种灌丛群落凋落物的水分涵养性能由于群落凋落物的水分涵养特征存在显著差异出现分化。红背山麻杆和牡荆灌丛的凋落物蓄积量(LS)和自然含水率(NWC)显著高于羊蹄甲灌丛,而它们的最大持水率(MWHR)则低于羊蹄甲灌丛。红背山麻杆和牡荆灌丛的最大拦蓄量(MIC)和有效拦蓄量(EIC)因此而显著高于羊蹄甲灌丛。(3)灌丛群落的叶功能性状 SLA、LDMC、LOMC、LPC 等分别与 MIC 和 EIC 等水分涵养性能特性存在显著相关性。叶功能型为低 LDMC+LOMC-高 SLA 的羊蹄甲灌丛群落具有较低的水分涵养性能,而叶功能型为高 LDMC+LOMC-低 SLA 的红背山麻杆和牡荆灌丛群落具有较高的水分涵养性能。为了提高生态系统的的水土保持功能,在进行退化生态系统生态恢复时应尽可能选择叶功能型为高 LDMC+LOMC-低 SLA 的群落类型。

**关键词:** 灌丛群落;叶功能性状;叶功能型;凋落物;水分涵养性能

## Leaf functional types of shrub communities and their relationship with water conservation of litter: a case study of three typical shrub communities in Guangxi

ZHAO Zixian<sup>1</sup>, DAI Fenglin<sup>1</sup>, LIU Yangyun<sup>2</sup>, LI Zeyu<sup>3</sup>, HUANG Yongwen<sup>2</sup>, CHEN Fangqing<sup>1,\*</sup>

1 Hubei International Scientific and Technological Cooperation Center of Ecological Conservation and Management in the Three Gorges Area, Yichang 443000, China

2 Hubei Zhengjiang Environmental Science and Technology Corporation, Yichang 443000, China

3 Yichang Ecological Environment Bureau, Yichang 443000, China

**Abstract:** *Ass. Vitex negundo*, *Ass. Alchornea trewioides*, and *Ass. Bauhinia purpurea*, three typical shrub communities distributing in the Guangxi Zhuang Autonomous Region, play an important role in soil and water conservation. Communities with relatively low disturbance were selected as study plots through field surveys in this region. The leaf functional traits of dominant species and the water conservation characteristics of litter in each quadrat were measured. The leaf functional type of

基金项目:科技部科技基础性工作专项(2015FY1103002-5)

收稿日期:2023-09-16; 网络出版日期:2024-03-29

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fqchen@ctgu.cn

shrub communities and their relationship with water conservation were revealed to better play the role of shrub communities in ecological restoration and soil and water conservation of degraded regional ecosystems. Results showed that: (1) There were significant differences in leaf functional traits among three shrub communities. The shrub communities differentiated into two leaf functional categories as a result: one type was represented by Ass. *B. purpurea* associated with low dry leaf matter and organic matter and high specific leaf area (low LDMC+LDMC-high SLA). Another type was represented by Ass. *A. trewioides* and Ass. *V. negundo* associated with high dry leaf matter and organic matter and low specific leaf area (high LDMC+LOMC-low SLA). Ass. *A. trewioides* and Ass. *V. negundo* further differentiated due to difference in leaf phosphorus content (LPC). (2) The water conservation performance of community litter was also differentiated among three shrub communities due to significant differences in water conservation characteristics of litter. The litter storage (LS) and natural water content (NWC) of Ass. *A. trewioides* and Ass. *V. negundo* were significantly higher than Ass. *B. purpurea*, while their maximum water holding rate (MWHR) was significantly lower than Ass. *B. purpurea*. The maximum interception capacity (MIC) and effective interception capacity (EIC) of Ass. *A. trewioides* and Ass. *V. negundo* therefore were significantly higher than that of Ass. *B. purpurea*. (3) The leaf functional traits of shrub community, such as SLA, LDMC, LOMC and LPC, were significantly correlated with the characteristics of water conservation performance, including MIC and EIC, respectively. The leaf functional type associated with low LDMC+LOMC-high SLA representing by Ass. *B. purpurea* had lower water conservation performance, while the leaf functional type associated with high LDMC+LOMC-low SLA representing by Ass. *A. trewioides* and Ass. *V. negundo* had higher water conservation performance. In order to improve the soil and water conservation function of ecosystems, community types with high LDMC+LOMC-low SLA leaf functional type should be adopted as much as possible to restore degraded ecosystems.

**Key Words:** shrub communities; leaf functional characteristics; leaf functional type; litter; water conservation performance

植物功能性状是指能够对生存环境的变化产生响应并对生态系统功能产生一定影响的植物性状<sup>[1]</sup>。植物可以通过改变叶片功能性状特征来适应气候、海拔、坡向等生态环境的变化<sup>[2]</sup>,同一植物群落各物种的叶功能性状对环境通常存在相似的响应,这种相似性也就是植物群落的叶功能型,反映了植物对相同生境适应策略的趋同性<sup>[3]</sup>。不同植物群落类型因物种组成的不同以及所处环境的差异,其叶功能型常常产生分化<sup>[4]</sup>。植物群落的凋落物具有涵养水分和减少地表径流的功能<sup>[5]</sup>。凋落物的水分涵养特性对植物群落的水土保持能力有着重要的影响<sup>[6]</sup>。叶片是植物群落凋落物的主要组成成分。目前关于植物群落叶功能型特征的研究主要集中于它们对环境的适应机制方面,而对于群落凋落物水分涵养特性的研究则主要集中于植物群落的水土保持性能方面,但是关于植物叶功能性状和群落叶功能型特征与凋落物水分涵养性能关系的研究则比较少见<sup>[7]</sup>。揭示植物群落叶功能型与凋落物水分涵养性能的关系,可以帮助我们准确认识植物群落凋落物水分涵养性能的形成机理,为退化生态系统生态修复和水土保持提供科学依据。

灌丛在全球范围内占陆地总面积的 45%,在中国占地面积达  $3.19 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ,在水土保持和物种多样性保育中起着十分重要的作用<sup>[8]</sup>。广西壮族自治区(以下简称“广西”)地处中国南部,地跨中亚热带、南亚热带和热带,因地貌多变、地质组成复杂、雨热条件优越和土壤类型多样,而具有十分丰富的灌丛资源。全区共分布有 72 种灌丛(群系),面积达  $3.29 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,占全区林地总面积的 21.10%<sup>[9]</sup>。牡荆(*Vitex negundo*)灌丛、红背山麻杆(*Alchornea trewioides*)灌丛和羊蹄甲(*Bauhinia purpurea*)灌丛为该地区常见的三种主要灌丛类型<sup>[10]</sup>。目前已开展了三种灌丛的群落特征<sup>[11-12]</sup>、叶功能性状<sup>[13-19]</sup>和水文效应<sup>[20-22]</sup>等方面的研究,但没有关于群落叶功能型及其与水文效应之间相互关系的报道。本研究以这三种灌丛群落为例证,通过对群落优势物种叶功能性状和群落凋落物水分涵养特征的调查与测定,旨在:(1)分析比较三种灌丛群落的叶功能性状,揭示其叶功能型特征;(2)分析比较三种灌丛群落凋落物的水分涵养特征,揭示其水分涵养性能;(3)分析叶功能性状与凋落物水分涵养特征的关系,揭示群落叶功能型与群落水分涵养性能的关系。

## 1 研究方法

### 1.1 样地位置及样方设置与调查

广西界于东经 104°28'—112°04'和北纬 20°54'—26°24'之间,总面积达  $2.36 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 。三种灌丛群落在广西主要分布于崇左市、百色市、河池市、南宁市等地<sup>[10]</sup>。本研究在充分勘察的基础上,分别在广西的宜州区、象州县和南丹县选取长势良好、受干扰程度低的牡荆灌丛群落、红背山麻杆灌丛群落和羊蹄甲灌丛群落作为样地(表 1)。在每个样地上分别设置 3 个 20 m×20 m 的大样方,3 个大样方边缘两两之间最小距离 5 m,最大距离不超过 50 m。在每个大样方内分别随机设置 3 个 5 m×5 m 的灌丛样方。每种灌丛类型各有 9 个灌丛样方,整个研究共设置了 27 个灌丛样方。

分别调查各灌丛样方内灌木的种类及其每株植物的株高、株数、冠幅等,并记录每个大样方的海拔、坡度、坡向等环境因子。同时还在每个大样方内分别随机设置 9 个 0.5 m×0.5 m 的小样方用于凋落物的调查。每种灌丛群落类型设置 27 个小样方,整个实验共设置 81 个小样方。调查各小样方凋落物储量,然后分别将原状凋落物装入自封袋保存,每种灌丛群落类型分别采集凋落物样品 27 份,整个实验共采 81 份凋落物样品。

### 1.2 群落植物叶功能性状测定

分别对每种灌丛群落类型的植物组成及其重要性进行调查和计算。然后从每个灌丛群落的各样方中选取重要值(重要值=(相对盖度+相对频数+相对密度)/3)大于 0.1 的灌木物种作为表征群落叶功能性状的调查物种(表 1),并各挑选 5 株能代表该物种在群落中长势(高度与大小)的植株作为调查对象,在其不同方位采集 10 片无虫病害且完全舒展的叶子。分别测定各叶片的叶面积(LA, Leaf area)、叶厚度(LT, leaf thickness)、比叶面积(SLA, Specific leaf area)。同时在相同部位再采集部分叶片用于叶干物质含量(LDMC, Leaf dry matter content)、叶有机质含量(LOMC, Leaf organic matter content)、叶氮含量(LNC, Leaf nitrogen content)和叶磷含量(LPC, Leaf phosphorus content)的测定。

#### 1.2.1 LA 和 LT 测量

用 WinRHIZO 分析系统(Regent Instruments Inc.加拿大)扫描计算 LA( $\text{cm}^2$ );用精度为 0.01 mm 的游标卡尺测量 LT,测量时,应避开叶脉,在距离主叶脉 25 mm 的上中下找三个点测量,并求其平均值。

#### 1.2.2 LDMC 和 SLA 计算

将采集的叶片置于水中,于 5℃避光保存 12h 后,取出擦干叶片表面水分,称重得到叶片饱和鲜重,然后将叶片置于烘箱中,烘干至恒重得到叶片干重。并分别计算其 LDMC(LDMC=叶片干重(g)/叶片饱和鲜重(g))和 SLA(SLA=LA( $\text{cm}^2$ )/叶片干重(g))。

#### 1.2.3 LOMC、LNC 和 LPC 测量和计算

将样品烘干后研磨过筛,消煮后分别用重铬酸钾法测定 LOMC(mg/g),用 SAN++连续流动分析仪(Skalar, 荷兰)测定 LNC(mg/g)和 LPC(mg/g)。

### 1.3 凋落物水分涵养特征的测定

#### 1.3.1 凋落物储量和自然含水率测定

将所采凋落物样品逐一用精度为 0.01 g 的电子天平称量其鲜重( $G_0$ ),然后置于 105℃烘箱中半个小时,再置于 80℃烘箱中烘至恒重,称量其干重( $G$ ),以此计算凋落物蓄积量(LS, Litter storage)( $\text{t}/\text{hm}^2$ )和自然含水率(NWC, Natural water content)(%):

$$M = G_0 / (0.25 \times 100) \quad (1)$$

$$C_0 = \frac{G_0 - G}{G} \times 100\% \quad (2)$$

式中, $M$ 为凋落物蓄积量( $\text{t}/\text{hm}^2$ ), $C_0$ 为自然含水率(NWC, Natural water content)(%), $G_0$ 为凋落物鲜重(g), $G$ 为凋落物干重(g),0.25 为灌丛群落凋落物样方面积( $\text{m}^2$ ),100 为单位( $\text{g}/\text{m}^2$ )到单位( $\text{t}/\text{hm}^2$ )的换算常数。

表 1 灌丛群落的物种组成及环境特征  
Table 1 The characteristics of species composition and environment of shrub communities

样地 Sample plot	群落类型 Community type	地理位置 Location	经度 Longitude	纬度 Latitude	优势种及其重要值 Dominant species and their important values	海拔 Altitude/m	坡向 Slope direction/(°)
1	牡荆 Ass. <i>Vitex negundo</i>	宣州区刘三 姐乡	108°40'31.63"E	24°32'43.43"N	牡荆 <i>Vitex negundo</i> (0.43)、金樱子 <i>Rosa laevigata</i> (0.16)、菝葜 <i>Smilax china</i> (0.12)、盐肤木 <i>Rhus chinensis</i> (0.11)	99	36
2					牡荆 <i>Vitex negundo</i> (0.32)、鸡桑 <i>Morus australis</i> (0.24)、金樱子 <i>Rosa laevigata</i> (0.13)、柘木 <i>Cudrania tricuspidata</i> (0.11)、白饭树 <i>Flueggea virosa</i> (0.11)	142	30
3					牡荆 <i>Vitex negundo</i> (0.37)、白饭树 <i>Flueggea virosa</i> (0.17)、柘木 <i>Cudrania tricuspidata</i> (0.14)、金樱子 <i>Rosa laevigata</i> (0.11)	163	20
4	红背山麻杆 Ass. <i>Alchornea treviioides</i>	象州县马坪镇	109°34'54.18"E	23°55'38.60"N	红背山麻杆 <i>Alchornea treviioides</i> (0.51)、浆果楝 <i>Cipadessa baccifera</i> (0.17)、瘤皮孔酸藤子 <i>Enbelia scandens</i> (0.13)	94	76
5					红背山麻杆 <i>Alchornea treviioides</i> (0.62)、鞘花 <i>Macrosolen cochinchinensis</i> (0.15)、羊蹄甲 <i>Bauhinia purpurea</i> (0.10)	91	30
6					红背山麻杆 <i>Alchornea treviioides</i> (0.54)、羊蹄甲 <i>Bauhinia purpurea</i> (0.21)、鞘花 <i>Macrosolen cochinchinensis</i> (0.17)	79	295
7	羊蹄甲 Ass. <i>Bauhinia purpurea</i>	南丹县大厂镇	107°36'14.46"E	24°56'15.53"N	羊蹄甲 <i>Bauhinia purpurea</i> (0.39)、苎麻 <i>Boehmeria nivea</i> (0.18)、假木豆 <i>Dendrolobium triangulare</i> (0.13)、六月雪 <i>Sertissa japonica</i> (0.10)	557	115
8					羊蹄甲 <i>Bauhinia purpurea</i> (0.45)、假木豆 <i>Dendrolobium triangulare</i> (0.14)、女贞 <i>Ligustrum lucidum</i> (0.14)、木芙蓉 <i>Hibiscus mutabilis</i> (0.10)	544	90
9					羊蹄甲 <i>Bauhinia purpurea</i> (0.37)、梵天花 <i>Urena procumbens</i> (0.16)、假木豆 <i>Dendrolobium triangulare</i> (0.12)	540	123

### 1.3.2 凋落物水文效应测定

凋落物的水分涵养研究采用室内浸泡法测定<sup>[6]</sup>。即将烘干后的凋落物置于 100 目尼龙袋中,放入盛有清水的容器中浸泡,在浸泡 24 h 时后取出,静置至没有水滴落时,用电子秤称其重量得到  $G_{\max}$ 。将得到的数据用以计算凋落物以下水分涵养参数:

$$C_{\max} = \frac{G_{\max} - G}{G} \times 100\% \quad (3)$$

$$Wc_{\max} = M(C_{\max} - C_0) \quad (4)$$

$$Wc = M(0.85C_{\max} - C_0) \quad (5)$$

式中,  $C_{\max}$  为最大持水率 (MWHR, Maximum water holding rate) (%),  $Wc_{\max}$  为最大拦蓄量 (MIC, Maximum interception capacity) ( $t/hm^2$ ),  $Wc$  为有效拦蓄量 (EIC, Effective interception capacity) ( $t/hm^2$ ),  $G_{\max}$  为凋落物浸泡 24h 的重量 (g)。

### 1.4 数据处理与分析

以灌丛群落类型为自变量,以叶功能性状特征值和凋落物水分涵养参数为因变量,分别进行单因素方差分析,并对三种灌丛群落类型的叶功能性状特征值进行主成分分析 (PCA),分析不同灌丛群落类型的叶功能型和水分涵养性能特征。然后将三种灌丛群落类型的叶功能性状特征值与凋落物水分涵养参数之间进行 Pearson 相关性分析,并以灌丛群落凋落物的水分涵养特性为响应变量,以灌丛群落的叶功能性状为解释变量,进行冗余分析 (RDA),分析灌丛群落叶功能型与水分涵养性能的关系和影响。上述分析分别利用 SPSS 软件 (SPSS 22) 和 R 语言 (R 4.1.3) 进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 三种灌丛群落的叶功能性状和叶功能型

三种灌丛群落的叶功能性状 LA、LDMC、LOMC、LT、SLA、LPC、C:N、N:P 和 C:P 存在显著差异 (表 2)。其中红背山麻杆群落的 LA 高于羊蹄甲群落,显著高于牡荆群落。LDMC 和 LOMC 在牡荆群落和红背山麻杆群落之间无显著差异,但是它们均显著高于羊蹄甲群落。红背山麻杆群落的 LT 显著高于牡荆群落和羊蹄甲群落。牡荆群落和红背山麻杆群落的 SLA 差异不显著,但它们均显著低于羊蹄甲群落。LPC 在羊蹄甲群落和

表 2 三种灌丛群落的叶功能性状特征

Table 2 Leaf functional traits of three shrub communities

叶功能性状 Leaf functional traits	牡荆群落 Ass. <i>V. negundo</i>	红背山麻杆群落 Ass. <i>A. trewioides</i>	羊蹄甲群落 Ass. <i>B. purpurea</i>
叶面积 LA/( $cm^2$ )	33.17±6.46b	42.65±9.33a	35.63±8.86ab
叶干物质含量 LDMC/(g/g)	0.25±0.02a	0.26±0.03a	0.21±0.03b
叶厚度 LT/mm	0.25±0.02b	0.37±0.04a	0.28±0.04b
比叶面积 SLA/( $cm^2/g$ )	157.67±20.12b	149.94±25.74b	234.95±61.11a
叶有机质含量 LOMC/(mg/g)	60.40±6.04a	60.47±7.11a	51.06±6.15b
叶氮含量 LNC/(mg/g)	9.98±1.01a	9.37±0.96a	9.82±1.44a
叶磷含量 LPC/(mg/g)	1.55±0.18a	1.01±0.32b	1.69±0.39a
叶碳氮比值 C:N	6.06±0.27b	6.45±0.28a	5.22±0.23c
叶氮磷比值 N:P	39.30±4.85b	64.62±19.50a	31.92±10.01b
叶碳磷比值 C:P	6.48±0.69b	9.96±2.74a	6.15±2.05b

LA:叶面积 Leaf area;LDMC:叶干物质含量 Leaf dry matter content;LT:叶厚度 Leaf thickness;SLA:比叶面积 Specific leaf area;LOMC:叶有机质含量 Leaf organic matter content;LNC:叶氮含量 Leaf nitrogen content;LPC:叶磷含量 Leaf phosphorus content;C:N:叶碳氮比值 Leaf carbon nitrogen ratio;N:P:叶氮磷比值 Leaf nitrogen phosphorus ratio;C:P:叶碳磷比值 Leaf carbon phosphorus ratio;表中数据为平均值±标准误差,同行不同小写字母代表差异显著 ( $P<0.05$ )

牡荆群落之间差异不显著,但两者均显著高于红背山麻杆群落。C:N 在各灌丛群落间均有显著差异,排序为红背山麻杆群落>牡荆群落>羊蹄甲群落。N:P 和 C:P 在牡荆群落和羊蹄甲群落之间无显著差异,但它们均显著小于红背山麻杆群落。

主成分分析中,LOMC、LDMC、LT、SLA 和 LPC 在群落叶功能性状轴 1 方向的分化起着重要的影响,而 SLA、LNC、LOMC 和 LDMC 则在群落叶功能性状轴 2 方向的分化起着重要的影响。主分量排序显示,叶功能性状的分化使得三种灌丛群落呈现两种不同的叶功能型(图 1),即以羊蹄甲为代表的低 LDMC+LOMC-高 SLA 类型,以及红背山麻杆和牡荆群落为代表的高 LDMC+LOMC-低 SLA 类型。后面一类又因红背山麻杆群落具有高 LT、LA、C:N、N:P 和 C:P,牡荆群落具有高 LPC 而进一步分化。

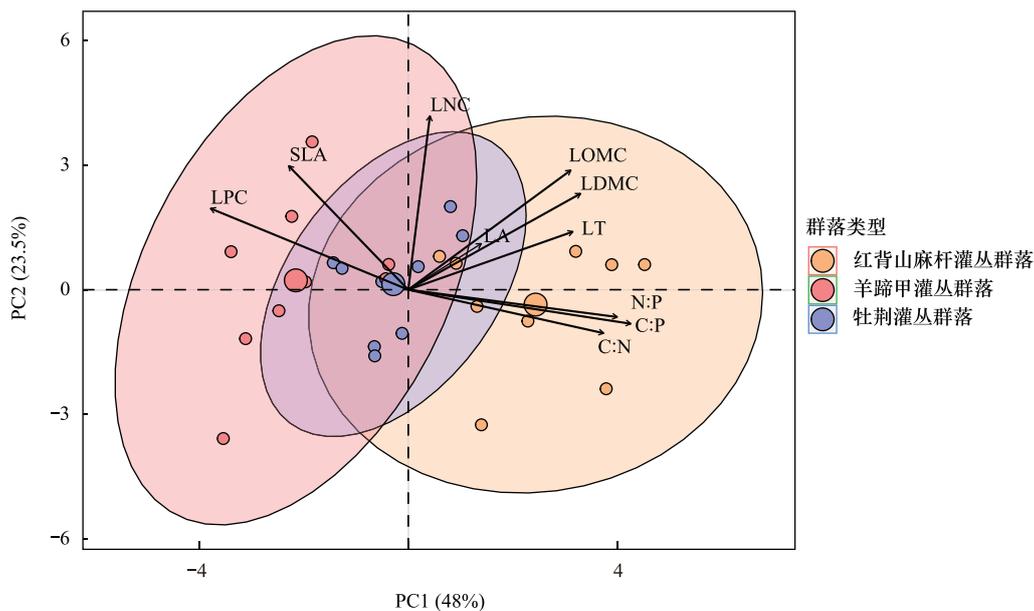


图 1 灌丛群落叶功能性状特征的主分量排序

Fig.1 Principal component ordination of leaf functional traits of shrub communities

LA:叶面积 Leaf area;LDMC:叶干物质含量 Leaf dry matter content;LT:叶厚度 Leaf thickness;SLA:比叶面积 Specific leaf area;LOMC:叶有机质含量 Leaf organic matter content;LNC:叶氮含量 Leaf nitrogen content;LPC:叶磷含量 Leaf phosphorus content;C:N:叶碳氮比值 Leaf carbon nitrogen ratio;N:P:叶氮磷比值 Leaf nitrogen phosphorus ratio;C:P:叶碳磷比值 Leaf carbon phosphorus ratio

## 2.2 三种灌丛群落凋落物的水分涵养性能特征

三种灌丛群落凋落物的水分涵养性能之间存在一定差异(表 3)。三种灌丛群落的 LS 在 3.92—5.06 t/hm<sup>2</sup> 范围之间,红背山麻杆群落和牡荆群落之间无显著差异,但它们均显著高于羊蹄甲群落。各灌丛群落凋落物的 NWC 在 16.69%—53.54% 范围之间,且灌丛群落间均存在显著差异,大小依次为羊蹄甲群落>牡荆群落>红背山麻杆群落。各灌丛群落凋落物的 MWHR 在 197.71%—236.43% 范围之间,牡荆群落和红背山麻杆群落之间无显著差异,但它们均显著低于羊蹄甲群落。各灌丛群落的 MIC 和 EIC 分别在 6.98—8.97 t/hm<sup>2</sup> 和 5.63—7.51 t/hm<sup>2</sup> 范围之间,且灌丛群落间均存在显著性差异,大小依次为红背山麻杆群落>牡荆群落>羊蹄甲群落。

## 2.3 灌丛群落的叶功能型与凋落物水分涵养性能的关系

Pearson 相关性分析显示,三种灌丛群落植物的叶功能性状与群落凋落物的水分涵养性能参数存在不同程度的相关性(表 4)。LDMC、LOMC 以及叶片 C:N、C:P 和 N:P 与 LS 呈显著正相关,SLA 和 LPC 与 LS 呈显著负相关。SLA 和 LPC 与 NWC 和 MWHR 呈显著正相关,LDMC、LOMC 以及叶片 C:N、C:P 和 N:P 均与 NWC 和 MWHR 呈显著负相关。SLA 和 LPC 与 MIC 和 EIC 呈显著负相关,LDMC、LT 以及叶片 C:N、C:P 和 N:P 与 MIC 和 EIC 呈显著正相关,LOMC 仅与 EIC 呈显著正相关。

表 3 三种灌丛凋落物的水分涵养性能特征

Table 3 Water conservation characteristics of litter of three shrub communities

群落类型 Community type	凋落物储量 LS/(t/hm <sup>2</sup> )	自然含水量 NWC/%	最大持水率 MWHR/%	最大拦蓄量 MIC/(t/hm <sup>2</sup> )	有效拦蓄量 EIC/(t/hm <sup>2</sup> )
牡荆群落 Ass. <i>V. negundo</i>	4.68±0.52a	23.48±6.26b	204.09±14.02b	8.01±0.46b	6.67±0.38b
红背山麻杆群落 Ass. <i>A. trewioides</i>	5.06±0.49a	16.69±2.98c	197.71±10.06b	8.97±0.69a	7.51±0.58a
羊蹄甲群落 Ass. <i>B. purpurea</i>	3.92±0.29b	53.54±4.38a	236.43±19.2a	6.98±0.66c	5.63±0.53c

LS:凋落物储量 Litter storage;NWC:自然含水量 Natural water content;MWHR:最大持水率 Maximum water holding rate;MIC:最大拦蓄量 Maximum interception capacity;EIC:有效拦蓄量 Effective interception capacity;表中数据为平均值±标准误差,同列不同小写字母代表差异显著( $P<0.05$ )

表 4 叶功能性状和凋落物水分涵养性能的 Pearson 相关性分析

Table 4 Pearson correlation analysis of leaf functional traits and litter water conservation characteristics

	叶面积 LA	叶干物 质含量 LDMC	叶厚度 LT	比叶面积 SLA	叶有机 质含量 LOMC	叶氮含量 LNC	叶磷含量 LPC	叶碳氮 比值 C:N	叶氮磷 比值 N:P	叶碳磷 比值 C:P
凋落物储量 LS	0.127	0.481 *	0.327	-0.612 **	0.396 *	-0.112	-0.506 **	0.652 **	0.555 **	0.476 *
凋落物自然含水量 NWC	-0.209	-0.682 **	-0.358	0.627 **	-0.568 **	0.079	0.526 **	-0.861 **	-0.560 **	-0.441 *
凋落物最大持水率 MWHR	-0.234	-0.506 **	-0.295	0.416 *	-0.426 *	0.101	0.525 **	-0.716 **	-0.510 **	-0.426 *
凋落物最大拦蓄量 MIC	0.142	0.502 **	0.425 *	-0.656 **	0.375	-0.173	-0.500 **	0.693 **	0.572 **	0.474 *
凋落物有效拦蓄量 EIC	0.153	0.537 **	0.430 *	-0.674 **	0.410 *	-0.165	-0.520 **	0.732 **	0.591 **	0.488 **

\* \*. 在置信度(双测)为 0.01 时,相关性是显著的;\*. 在置信度(双测)为 0.05 时,相关性是显著的

将叶功能性状作为解释变量,凋落物的水分涵养性能特征作为响应变量,进行冗余分析和排序(RDA)。Monte Carlo 置换检验(表 5)所有排序轴均达到极显著水平( $P<0.01$ )。第 1 排序轴的特征值和解释比例分别为 2.9850 和 0.5970,第 2 排序轴的特征值和解释比例分别为 0.3908 和 0.0781。RDA 排序结果显示(图 2),SLA 和 LPC 对 NWC 和 MWHR 有正影响,对 LS、MIC 和 EIC 有负影响。LDMC 和 LT 对 NWC 和 MWHR 有负影响,对 LS、MIC 和 EIC 有正影响。以羊蹄甲群落为代表的低 LDMC+LOMC-高 SLA 的叶功能型倾向于具有较低的水分涵养性能,而叶功能型为高 LDMC+LOMC-低 SLA 的红背山麻杆和牡荆群落倾向于具有较高的水分涵养性能,且因 LPC 的差异,在水分涵养性能上进一步分化。

表 5 叶功能性状与水分涵养特征在典范轴上的得分和 RDA 统计结果

Table 5 Scores and RDA statistical results of leaf functional traits and water conservation characteristics on the canonical axis

因子 Factor	第一 排序轴 Axis 1	第二 排序轴 Axis 2	因子 Factor	第一 排序轴 Axis 1	第二 排序轴 Axis 2
叶面积 LA	-0.2206	0.1755	最大持水率 MWHR	0.9497	-0.7079
叶干物质含量 LDMC	-0.7031	0.1964	最大拦蓄量 MIC	-1.2115	-0.3872
叶厚度 LT	-0.4780	-0.0722	有效拦蓄量 EIC	-1.2574	-0.3297
比叶面积 SLA	0.7796	0.1584	特征值 Eigenvalue	2.9850	0.3908
叶氮含量 LNC	0.1635	0.0759	解释比例 Proportion explanation	0.5970	0.0781
叶磷含量 LPC	0.6630	-0.1390	解释累计比例 Cumulative proportion	0.5970	0.5852
凋落物储量 LS	-1.0921	-0.1787	所有轴的置换检验	$F = 7.1136$	$P = 0.001$
自然含水量 NWC	1.2898	-0.3151	Permutation test of all axes		

### 3 讨论

#### 3.1 灌丛群落的叶功能型特征

植物叶功能性状与植物所生存环境有着十分复杂的关系,分布于不同纬度和海拔梯度的植物群落因温度、

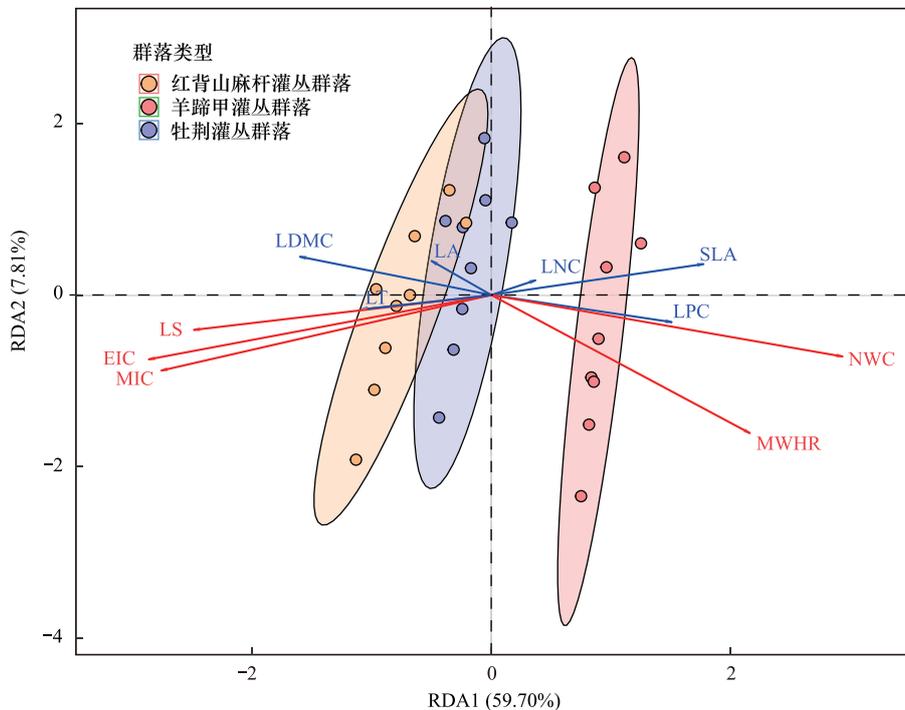


图2 灌丛群落叶功能性状与凋落物水分涵养性能的 RDA 排序

Fig.2 RDA ordination of leaf functional traits and litter water conservation characteristics of shrub communities

LS:凋落物储量 Litter storage;NWC:自然含水率 Natural water content;MWHR:最大持水率 Maximum water holding rate;MIC:最大拦蓄量 Maximum interception capacity;EIC:有效拦蓄量 Effective interception capacity;RDA: 冗余分析 Redundancy analysis

水分、土壤理化性质等环境因子的异质性,植物的叶功能性状常进行分化<sup>[23]</sup>。在气候温暖、湿润、阳光充沛或土壤比较肥沃的地方,植物一般具有较大的叶片和较小的比叶面积,而在寒冷、干旱、光辐射较强或土壤贫瘠的地方,植物通常具有较小的叶片和较大的比叶面积<sup>[24-25]</sup>。土壤作为植株生长的基质,其理化性质也会对植物叶功能性状产生重要影响<sup>[26]</sup>。营养丰富的土壤有利于大叶面积和比叶面积的植物定居与生长,而营养不足的土壤则有利于小叶面积和比叶面积的植物定居与生长<sup>[27]</sup>。因此,植物叶功能性状特征也被认为是植物在资源获取与分配中所采取的策略。具有大比叶面积的植物能够高效利用资源和快速生长被认为是“低投入-快速回报”类型,而具有小比叶面积的植物因资源利用效率低和生长速率慢而被认为是“高投入-缓慢回报”类型<sup>[28]</sup>。

群落内不同层次植物的叶功能性状会因内部环境的差异而发生多样性的变化以提高群落的生产率<sup>[29]</sup>,但在群落水平上植物功能性状(叶功能型)总体上对环境变化有着与物种近似的适应规律<sup>[30-31]</sup>。不同植物群落的叶功能型也会通过调节其叶面积、叶片厚度、叶干物质含量和比叶面积等来适应环境的变化<sup>[32-33]</sup>。本研究中,四种灌丛群落的叶功能型因所生存环境的差异而产生了分化。羊蹄甲群落为低 LDMC+LOMC-高 SLA 功能型,杜荃山、红背山麻杆和牡荊群落为高 LDMC+LOMC-低 SLA 功能型。低 LDMC+LOMC-高 SLA 功能型在叶经济谱中属于“快速投资-收益”型,趋向于光合能力强、比叶面积大和寿命短的生存策略<sup>[34]</sup>。羊蹄甲群落由于生境地的海拔最高、坡向朝阳,因此群落植物的比叶面积显著大于其他两种灌丛群落,而叶片干物质含量和有机质含量显著小于其他两种灌丛群落。红背山麻杆群落和牡荊群落由于生境地的海拔相对较低、坡向朝阴,群落的叶片干物质含量和有机质含量均达到较高水平,而比叶面积则处于最低和较低水平。

### 3.2 灌丛群落植物叶功能型对凋落物的水分涵养特征的作用

植物群落凋落物的拦蓄量取决于群落的凋落物的储量和持水性能,凋落物储量和持水性能越高,植物群落凋落物的拦蓄量也就越高<sup>[35]</sup>。不同群落类型因物种组成和生境的不同,其凋落物储量往往有着较大的差异<sup>[36]</sup>。凋落物的持水性能为凋落物最大持水率与自然含水率之间的差值,其主要取决于凋落物的物种组成、理化性质

和水热条件等<sup>[37]</sup>。不同灌丛群落因优势物种的不同,其凋落物蓄积量及其持水性能存在着较大差异<sup>[38]</sup>,并由此导致凋落物水分涵养性能的不同<sup>[39]</sup>。本研究中,红背山麻杆群落因具有最大的凋落物储量和最低的自然含水率,其最大拦蓄量和有效拦蓄量在三种灌丛群落中处于最高水平。羊蹄甲群落因具有最低的凋落物储量和最高的自然含水率,其最大拦蓄量和有效拦蓄量在三种灌丛群落中处于最低水平。牡荆群落凋落物储量和自然含水率处于中间水平,因此其最大拦蓄量和有效拦蓄量也处于中间水平。

植物叶片是植物群落凋落物的主要成分,植物叶功能性状在一定程度上影响和决定了凋落物的储量和持水性能,并进一步影响到群落凋落物的水分涵养性能<sup>[40]</sup>。有研究表明比叶面积越高落叶更容易分解<sup>[41]</sup>,凋落叶年损失率与叶片功能性状之间存在显著相关<sup>[42]</sup>。叶片干物质含量越大,叶片自然含水率也会越小,形成凋落物后其降解程度以及自然含水率和最大持水率也相应较小<sup>[43]</sup>。比叶面积大的植物往往具有较低的干物质含量和较高含水率,叶片容易被分解,具有较大的最大持水率<sup>[7]</sup>。凋落物的C、N、P含量及其比值对凋落物层微生物群落结构功能和酶活性有着重要影响,并由此影响凋落物的降解进程及其水分涵养性能<sup>[44]</sup>。有研究发现凋落叶分解速率与凋落物起始N含量、N:P值呈显著正相关,而与C:N值、C:P值呈显著负相关<sup>[45]</sup>。此外凋落物中纤维素、木质素等难分解物质的含量对凋落物的持水性能产生影响<sup>[46]</sup>。本研究中,三种灌丛群落叶片的干物质含量、有机质含量、比叶面积、磷含量、C:N、C:P和N:P与凋落物的储量、自然含水率和最大持水率呈显著相关性,并因此与凋落物最大拦蓄量和有效拦蓄量呈显著相关性。

凋落物层主要用过截留、吸持降水、下渗和蒸发影响水分在群落中的传输过程<sup>[47]</sup>。由于不同群落类型的叶功能型出现了分化,群落凋落物的理化性质和降解进程也因此而不同,并由此导致凋落物的水分涵养性能的不同<sup>[7]</sup>。本研究中,羊蹄甲群落的叶功能型为低LDMC+LOMC-高SLA类型。低叶片干物质含量和高比叶面积使得叶片具有较低的干物质含量<sup>[48]</sup>,同时由于叶片磷含量较高,C:N、C:P和N:P相对较低,其叶片较为容易被降解<sup>[49]</sup>。低LDMC+LOMC-高SLA类型的灌丛群落一般生活在资源相对丰富、水热适宜的条件下。这种生境条件下,雨水相对充沛,群落凋落物的持水性能通常较高,但凋落物储量和拦蓄能力较小,这样雨水更容易在土地上形成径流和击溅侵蚀,同时较薄的凋落物层使水分更容易蒸发,因此这种功能型为主的群落水文活动更加剧烈,凋落物的水土保持效应有限<sup>[50]</sup>。红背山麻杆和牡荆群落的叶功能型为高LDMC+LOMC-低SLA类型。高叶片干物质含量与低比叶面积使得叶片具有较高的干物质含量<sup>[51]</sup>。同时由于叶片磷含量为最低和较低,C:N、C:P和N:P为最高和较高,叶片的分解速率相对较低<sup>[52]</sup>。高LDMC+LOMC-低SLA类型的灌丛群落一般生活在资源相对贫瘠,水热条件较差的条件下,这种生境条件下,雨水相对缺乏,凋落物储量和拦蓄量较大,可以较好的拦蓄和储存雨水,减缓地表径流冲刷和雨滴击溅侵蚀,具有良好的水土保持效应<sup>[53]</sup>。

#### 4 结论

本文通过样方法实地调查广西常见分布的羊蹄甲、红背山麻杆和牡荆等三种灌丛群落的叶功能性状和凋落物水分涵养性能,分析与揭示了灌丛群落的叶功能型分化特点及其与凋落物水分涵养性能之间的关系。三种灌丛群落分化形成了以羊蹄甲为代表的低LOMC+LDMC-高SLA的叶功能型,以及以红背山麻杆群落和牡荆群落为代表的高LDMC+LOMC-低SLA的叶功能型。三种灌丛群落凋落物的水分涵养性能具有显著差异,最大拦蓄量和有效拦蓄量的大小依次为红背山麻杆群落、牡荆群落和羊蹄甲灌丛群落。相关分析显示,灌丛群落的叶功能性状与凋落物水分涵养性能之间存在一定关联性,其中比叶面积和叶片磷含量与凋落物的自然含水率和最大持水率呈显著正相关,而与凋落物储量、最大拦蓄量和有效拦蓄量呈显著负相关。叶片干物质含量和叶厚度与凋落物自然含水率和最大持水率呈显著负相关,而与凋落物储量、最大拦蓄量和有效拦蓄量呈显著正相关。冗余分析和排序表明,叶功能型的分化引起了群落凋落物水分涵养性能的变化,叶功能型为高LDMC+LOMC-低SLA的红背山麻杆群落和牡荆群落具有较高的水分涵养性能,而叶功能型为低LDMC+LOMC-高SLA的羊蹄甲群落具有较低的水分涵养性能。在利用灌丛群落进行区域退化生态系统生态修复时,应尽可能选择高LDMC+LOMC-低SLA叶功能型的灌丛植株。

## 参考文献(References):

- [ 1 ] Díaz S, Noy-Meir I, Cabido M. Can grazing response of herbaceous plants be predicted from simple vegetative traits? *Journal of Applied Ecology*, 2001, 38(3): 497-508.
- [ 2 ] Campetella G, Chelli S, Simonetti E, Damiani C, Bartha S, Wellstein C, Giorgini D, Puletti N, Mucina L, Cervellini M, Canullo R. Plant functional traits are correlated with species persistence in the herb layer of old-growth beech forests. *Scientific Reports*, 2020, 10: 19253.
- [ 3 ] Westoby M, Falster D S, Moles A T, Vesk P A, Wright I J. Plant ecological strategies: some leading dimensions of variation between species. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2002, 33(1): 125-159.
- [ 4 ] 李宏伟, 王孝安, 郭华, 王世雄, 夏菲. 黄土高原子午岭不同森林群落叶功能性状. *生态学杂志*, 2012, 31(3): 544-550.
- [ 5 ] 闫文德, 张学龙, 王金叶, 王艺林, 傅辉恩. 祁连山森林枯落物水文作用的研究. *西北林学院学报*, 1997, (2): 8-15.
- [ 6 ] 闫俊华, 周国逸, 唐旭利, 张德强. 鼎湖山 3 种演替群落凋落物及其水分特征对比研究. *应用生态学报*, 2001, 12(4): 509-512.
- [ 7 ] 王玉平. 重庆石灰岩和砂岩地区植物凋落叶持水特征研究[D]. 重庆: 西南大学, 2012.
- [ 8 ] Götmark F, Götmark E, Jensen A M. Why be a shrub? A basic model and hypotheses for the adaptive values of a common growth form. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7: 1095.
- [ 9 ] 温远光, 李治基, 李信贤, 朱宏光, 梁宏温, 和太平, 庄嘉, 罗应华, 吴庆标, 严理. 广西植被类型及其分类系统. *广西科学*, 2014, 21(5): 484-513.
- [ 10 ] 苏宗明, 李先琨, 丁涛, 宁世江, 陈伟烈, 莫新礼, 英文共同题名: The vegetation of Guangxi. 广西植被-第一卷. 北京: 中国林业出版社, 2014.
- [ 11 ] 李传磊. 浙江省丹霞地貌岩生灌木种群的生态位研究. *林业科技*, 2023, 48(6): 27-30.
- [ 12 ] 鲁光荣, 陈芳清, 吕坤, 吴宇, 黄祥丰, 文如歌. 广西南亚热带灌丛群落物种组成与多样性特征. *林业资源管理*, 2022(3): 89-95.
- [ 13 ] 周济源, 何俊洁, 郭治远, 王贝贝, 张兴旺, 郭传友. 淮北相山主要优势物种比叶面积与叶干物质含量初步研究. *淮北师范大学学报(自然科学版)*, 2013, 34(3): 51-54.
- [ 14 ] 何芳远, 苏权, 陈坤铨, 陈善栋, 姜勇, 罗明, 梁士楚. 基于功能性状及系统发育的桂林喀斯特石山群落构建. *广西师范大学学报: 自然科学版*, 2023, 41(3): 171-181.
- [ 15 ] 苑晓霞, 刘润红, 盘远方, 郑沁然, 姜勇. 桂林喀斯特石山不同坡向乔灌木功能性状对比研究. *广西科学院学报*, 2019, 35(4): 253-261.
- [ 16 ] 杨慧, 李青芳, 涂春艳, 曹建华. 桂林毛村岩溶区典型植物叶片碳、氮、磷化学计量特征. *广西植物*, 2015, 35(4): 493-499, 555.
- [ 17 ] 宋豫秦, 常磊, 杨晓靖, 蔡博峰. 群落结构和叶面积指数在具炭山植被次生演替中的变化. *生态学杂志*, 2010, 29(4): 643-648.
- [ 18 ] 董蕾, 曹洪麟, 叶万辉, 徐志防, 吴林芳, 陈贻竹. 5 种喀斯特生境植物叶片解剖结构特征. *应用与环境生物学报*, 2011, 17(5): 747-749.
- [ 19 ] 刘宏伟, 刘文丹, 王微, 柴捷, 陶建平. 重庆石灰岩地区主要木本植物叶片性状及养分再吸收特征. *生态学报*, 2015, 35(12): 4071-4080.
- [ 20 ] 邓艳, 蒋忠诚, 李衍青, 胡阳. 广西不同石漠化程度下典型植物水分来源分析. *热带地理*, 2015, 35(3): 416-421.
- [ 21 ] 聂云鹏, 陈洪松, 王克林. 石灰岩地区连片出露石丛生境植物水分来源的季节性差异. *植物生态学报*, 2011, 35(10): 1029-1037.
- [ 22 ] 代奉林, 陈芳清, 吕坤, 刘杨赞. 广西壮族自治区 4 种典型灌丛凋落物层的水文效应. *林业资源管理*, 2022(1): 166-173.
- [ 23 ] 潘红丽, 李迈和, 蔡小虎, 吴杰, 杜忠, 刘兴良. 海拔梯度上的植物生长与生理生态特性. *环境学报*, 2009, 18(2): 722-730.
- [ 24 ] Wright I J, Reich P B, Cornelissen J H C, Falster D S, Garnier E, Hikosaka K, Lamont B B, Lee W, Oleksyn J, Osada N, Poorter H, Villar R, Warton D I, Westoby M. Assessing the generality of global leaf trait relationships. *New Phytologist*, 2005, 166(2): 485-496.
- [ 25 ] Wang C G, He J M, Zhao T H, Cao Y, Wang G J, Sun B, Yan X F, Guo W, Li M H. The smaller the leaf is, the faster the leaf water loses in a temperate forest. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 58.
- [ 26 ] Becknell J M, Powers J S. Stand age and soils as drivers of plant functional traits and aboveground biomass in secondary tropical dry forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 2014, 44(6): 604-613.
- [ 27 ] Ordoñez J C, Van Bodegom P M, Witte J P M, Wright I J, Reich P B, Aerts R. A global study of relationships between leaf traits, climate and soil measures of nutrient fertility. *Global Ecology and Biogeography*, 2009, 18(2): 137-149.
- [ 28 ] Shipley B, Lechowicz M J, Wright I, Reich P B. Fundamental trade-offs generating the worldwide leaf economics spectrum. *Ecology*, 2006, 87(3): 535-541.
- [ 29 ] Roscher C, Schumacher J, Lipowsky A, Gubsch M, Weigelt A, Pompe S, Kolle O, Buchmann N, Schmid B, Schulze E D. A functional trait-based approach to understand community assembly and diversity-productivity relationships over 7 years in experimental grasslands. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2013, 15(3): 139-149.
- [ 30 ] Li Y Q, Reich P B, Schmid B, Shrestha N, Feng X, Lyu T, Maitner B S, Xu X T, Li Y C, Zou D T, Tan Z H, Su X Y, Tang Z Y, Guo Q H, Feng X J, Enquist B J, Wang Z H. Leaf size of woody dicots predicts ecosystem primary productivity. *Ecology Letters*, 2020, 23(6): 1003-1013.
- [ 31 ] Mouillot D, Villéger S, Scherer-Lorenzen M, Mason N W H. Functional structure of biological communities predicts ecosystem multifunctionality. *PLoS*

- One, 2011, 6(3): e17476.
- [32] He N P, Liu C C, Tian M, Li M L, Yang H, Yu G R, Guo D L, Smith M D, Yu Q, Hou J H. Variation in leaf anatomical traits from tropical to cold-temperate forests and linkage to ecosystem functions. *Functional Ecology*, 2018, 32(1): 10-19.
- [33] Wang R L, Yu G R, He N P, Wang Q F, Zhao N, Xu Z W, Ge J P. Latitudinal variation of leaf stomatal traits from species to community level in forests: linkage with ecosystem productivity. *Scientific Reports*, 2015, 5: 14454.
- [34] 何芸雨, 郭水良, 王喆. 植物功能性状权衡关系的研究进展. *植物生态学报*, 2019, 43(12): 1021-1035.
- [35] 兰亚男, 孙旭, 秦富仓, 乌都, 李亚南. 阴山北麓不同林分类型枯落物层持水性研究. *水土保持研究*, 2019, 26(6): 151-157.
- [36] 张理宏, 李昌哲, 杨立文. 北京九龙山林地对降雨的调蓄功能. *林业科学研究*, 1994, 7(2): 162-167.
- [37] 王忠禹, 刘国彬, 王兵, 汪建芳, 肖婧, 李兆松. 黄土丘陵区典型植物枯落物凋落动态及其持水性. *生态学报*, 2019, 39(7): 2416-2425.
- [38] 刘世荣, 孙鹏森, 温远光. 中国主要森林生态系统水文功能的比较研究. *植物生态学报*, 2003, 27(1): 16-22.
- [39] 田菊, 李国婧, 刘洋. 和林格尔县 4 种人工林枯落物水文效应研究. *林业与环境科学*, 2020, 36(6): 1-8.
- [40] Bakker M A, Carreño-Rocabado G, Poorter L. Leaf economics traits predict litter decomposition of tropical plants and differ among land use types. *Functional Ecology*, 2011, 25(3): 473-483.
- [41] Santiago L S. Extending the leaf economics spectrum to decomposition: evidence from a tropical forest. *Ecology*, 2007, 88(5): 1126-1131.
- [42] 张晴晴. 物种和功能多样性对凋落叶分解的影响[D]. 上海: 华东师范大学, 2016.
- [43] Fortunel C, Garnier E, Joffre R, Kazakou E, Queded H, Grigulis K, Lavorel S, Ansquer P, Castro H, Cruz P, Doležal J, Eriksson O, Freitas H, Golodets C, Jouany C, Kigel J, Kleyer M, Lehsten V, Lepš J, Meier T, Pakeman R, Papadimitriou M, Papanastasis V P, Quétier F, Robson M, Sternberg M, Theau J P, Thébaud A, Zarovali M. Leaf traits capture the effects of land use changes and climate on litter decomposability of grasslands across Europe. *Ecology*, 2009, 90(3): 598-611.
- [44] Liu Y, Shen X, Chen Y M, Wang L F, Chen Q M, Zhang J, Xu Z F, Tan B, Zhang L, Xiao J J, Zhu P, Chen L H. Litter chemical quality strongly affects forest floor microbial groups and ecoenzymatic stoichiometry in the subalpine forest. *Annals of Forest Science*, 2019, 76(4): 106.
- [45] 李雪峰, 韩士杰, 胡艳玲, 赵玉涛. 长白山次生针阔混交林凋落物中有机物分解与碳、氮和磷释放的关系. *应用生态学报*, 2008, 19(2): 245-251.
- [46] 吴迪, 韩振诚, 李苇洁, 田奥, 王加国. 马缨杜鹃不同花叶比例凋落物的分解程度和持水性能研究. *水土保持学报*, 2020, 34(5): 186-191.
- [47] 王金叶. 祁连山水源涵养林生态系统水分传输过程与机理研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2006.
- [48] 庞世龙, 欧芷阳, 凌福诚, 何峰, 陆国导, 彭玉华. 桂西南岩溶区 18 种适生植物叶性状变异及经济谱. *生态学杂志*, 2021, 40(10): 3041-3049.
- [49] 秦立厚. 长白山阔叶红松林凋落叶分解特性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2021.
- [50] 朱金兆, 刘建军, 朱清科, 吴钦孝. 森林凋落物层水文生态功能研究. *北京林业大学学报*, 2002, (Z1): 30-34.
- [51] 段媛媛, 宋丽娟, 牛素旗, 黄婷, 杨改河, 郝文芳. 不同林龄刺槐叶功能性状差异及其与土壤养分的关系. *应用生态学报*, 2017, 28(1): 28-36.
- [52] 葛晓改, 曾立雄, 肖文发, 黄志霖, 周本智. 三峡库区森林凋落叶化学计量学性状变化及与分解速率的关系. *生态学报*, 2015, 35(3): 779-787.
- [53] 方斌, 黄俊文, 赵洋毅, 朱艳艳. 滇中地区典型林分林地凋落物及土壤水文效应. *防护林科技*, 2016(6): 18-21, 30.