

DOI: 10.11766/trxb201907170370

陈海霞, 黄宗胜, 赵明伟, 李祖国, 刘逸夫, 张丽欣, 杨春, 杨政蓉, 张元博. 喀斯特地区四种草本植物及其基质的优先选择[J]. 土壤学报, 2020, 57(4): 1017-1031.

CHEN Haixia, HUANG Zongsheng, ZHAO Mingwei, LI Zuguo, LIU Yifu, ZHANG Lixin, YANG Chun, YANG Zhengrong, ZHANG Yuanbo. Four Species of Herbs in Karst Areas and Their Adaptabilities to the Karst Matrices[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(4): 1017-1031.

## 喀斯特地区四种草本植物及其基质的优先选择\*

陈海霞<sup>1</sup>, 黄宗胜<sup>2†</sup>, 赵明伟<sup>2</sup>, 李祖国<sup>1, 3</sup>, 刘逸夫<sup>1</sup>, 张丽欣<sup>2</sup>, 杨春<sup>1</sup>,  
杨政蓉<sup>1</sup>, 张元博<sup>2, 4</sup>

(1. 贵州大学林学院, 贵阳 550025; 2. 贵州大学建筑与城市规划学院, 贵阳 550025; 3. 遵义市园林管理站, 贵州遵义 563000; 4. 贵州工商职业学院人文体育学院, 贵阳 551400)

**摘要:** 为弄清植物对喀斯特基质的优先选择, 用盆栽法研究了四种植物对喀斯特不同基质的适应性。结果表明: 整体上随植物生长, 基质理化性质除钾含量降低外, 其他均增加; 发芽率和存活率以石灰土、<1 mm 砂、<1 mm 砂+石灰土最高, 碎石、碎石+枯落物最低, 白三叶草发芽率最高、狗牙根存活率最高; 株数、株高、盖度以石灰土、<1 mm 砂、<1 mm 砂+枯落物高而碎石、碎石+枯落物低, 且盖度均呈升高趋势; 生物量和叶绿素含量狗牙根和白三叶草高而芒草和高羊茅较低, 生物量以石灰土、<1 mm 砂、<1 mm 砂+枯落物高而碎石、碎石+枯落物低, 叶绿素含量以<1 mm 砂+石灰土、石灰土+1 mm~5 mm 砂高而碎石低;  $\delta^{13}\text{C}$  值芒草和狗牙根高而白三叶草和高羊茅低, 且  $\delta^{13}\text{C}$  值与植物及生长基质有关。综上, 四种植物对石灰土、<1 mm 砂、<1 mm 砂+枯落物适应性强, 对碎石、碎石+枯落物适应性差; 狗牙根和芒草适应性最强, 白三叶草次之, 高羊茅最差, 喀斯特生态修复可优先选择芒草、狗牙根。

**关键词:** 喀斯特; 草本植物; 基质; 适应性; 生态恢复

**中图分类号:** Q14 **文献标志码:** A

## Four Species of Herbs in Karst Areas and Their Adaptabilities to the Karst Matrices

CHEN Haixia<sup>1</sup>, HUANG Zongsheng<sup>2†</sup>, ZHAO Mingwei<sup>2</sup>, LI Zuguo<sup>1,3</sup>, LIU Yifu<sup>1</sup>, ZHANG Lixin<sup>2</sup>, YANG Chun<sup>1</sup>,  
YANG Zhengrong<sup>1</sup>, ZHANG Yuanbo<sup>2,4</sup>

(1. Forestry College of Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. City Plan and Architecture College of Guizhou University, Guiyang 550025, China; 3. Zunyi Garden Management Station, Zunyi, Guizhou 563000, China; 4. College of Humanities and Physical Education, Guizhou Technology and Business Institute, Guiyang 551400, China)

**Abstract:** 【Objective】 This paper is aimed to find out priority of plants in adaptability to karst matrices. 【Method】 Four native species of plants, *Cynodon dactylon*, *Miscanthus sinensis*, *Trifolium repens* and *Festuca elata* in the karst areas were selected for

\* 国家自然科学基金项目(31560187, 51868008, 51987187)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos.31560187, 51868008, 51987187)

† 通讯作者: Corresponding author, E-mail: hzsxjh@126.com

作者简介: 陈海霞(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事退化生态系统恢复, 景观规划设计研究。E-mail:1434473499@qq.com

收稿日期: 2019-07-17; 收到修改稿日期: 2019-11-27; 网络首发出版日期(www.cnki.net): 2020-03-11

test in a pot experiment with pots packed with different matrices, separately 【Result】Results show that the karst habitat diversifies in plant growing matrix. Physico-chemical properties of the matrices as a whole improved with plants growing on and on, except for decrease in total potassium content. The plants were the highest in germination rate and survival rate in the pots of limestone soil, < 1 mm sand and < 1 mm sand + limestone soil and the lowest in the pots of limestone debris and limestone debris + litter, while among the four species of plants, *Trifolium repens* and *Cynodon dactylon* was the highest in germination rate and survival rate, respectively. With the plants growing on and on, the plants were higher in plant number, plant height and coverage in the pots of limestone soil, < 1 mm sand, < 1 mm sand + litter and lower in the pots of limestone debris and limestone debris + litter; and the plants in all the pots increased in coverage, and only *Cynodon dactylon* increased in number. The plants in the pots of limestone soil, < 1 mm sand, litter, and < 1 mm sand + litter were the highest, and the lowest in the pots of limestone debris, and limestone debris + litter in biomass, while among the plants, *Cynodon dactylon* and *Trifolium repens* were high and *Miscanthus sinensis* and *Festuca elata* were low. The plants were high in total chlorophyll in the pots of < 1 mm sand, limestone soil, limestone soil + 1 mm–5 mm sand and < 1 mm sand+ 1 mm–5 mm sand + limestone debris + limestone soil, and low in the pots of limestone debris, while among the plants, *Trifolium repens* and *Cynodon dactylon* were higher and *Miscanthus sinensis* and *Festuca elata* lower, and *Miscanthus sinensis* and *Cynodon dactylon* were higher in  $\delta^{13}\text{C}$  than *Trifolium repens* and *Festuca elata*. The value of  $\delta^{13}\text{C}$  in the plant is related not only to species of the plant, but also to the matrix it grew in. 【Conclusion】To sum up, the plants in karst areas can grow not only in limestone soil, but also in other matrices. The four species of plants in this experiment are highly adaptable to the matrices of limestone soil, < 1 mm sand, < 1 mm sand + litter and limestone soil + 1 mm–5 mm sand, fairly adaptable to 1 mm–5 mm sand, litter, <1 mm sand + 1 mm–5 mm sand + limestone debris + litter, limestone soil + 1 mm–5 mm sand + litter, <1 mm sand + limestone soil + litter and 1 mm–5 mm sand + litter, and barely adaptable to limestone debris and limestone debris + litter, and *Cynodon dactylon* and *Miscanthus sinensis* are more adaptable than *Trifolium repens*, and *Festuca elata*. Therefore, *Cynodon dactylon* and *Miscanthus sinensis* can be selected preferentially as pioneer plant for ecological restoration in karst areas. The extension from studies on the single soil matrix to studies on plant growing matrices of karst areas helps broadens the research theory and perspective, which is of great significance to ecological vegetation restoration in karst areas.

**Key words:** Karst; Herb plants; Matrix; Adaptability; Ecological restoration

当前喀斯特区石漠化问题已成为该区经济和生态可持续发展的瓶颈, 石漠化的生态恢复和重建亦成为研究热点。喀斯特区生态环境恶劣, 土层浅薄且不连续, 成土速率慢<sup>[1]</sup>, 由于土层浅薄和岩石的高渗透性<sup>[2]</sup>, 喀斯特生境中不同基质普遍存在不同程度的水分亏缺, 而基质的持水能力及其理化特性会影响植物生长, 且植物对不同基质的适应性亦不同, 因此开展不同植物对喀斯特生境中不同基质的适应性研究, 能够为喀斯特区植被恢复初期提供物种选择及其生长基质优劣判定提供理论依据, 对喀斯特石漠化生态系统恢复重建具有指导意义。

适应是生物在环境中没经过生存竞争而形成的一种适合环境条件的特性, 它是自然选择的结果, 适应性是指生物适应环境的程度<sup>[3]</sup>。近年来, 国内学者从不同的角度研究了植物对喀斯特生境的适应性, 包括干旱胁迫中的光合特性<sup>[4]</sup>、生理机制<sup>[5]</sup>、植物水分利用方式<sup>[6]</sup>及植物对高钙的适应性<sup>[7]</sup>。此外,

对喀斯特石漠化区的典型植物生理生态适应性的研究报道也比较多<sup>[8]</sup>, 但是现有的研究仅仅揭示了植物对石漠化逆境的适应方式与对策, 其对各种极端生境类型低生态容量的适应性缺乏研究。土壤是地球陆地表面能生长绿色植物的疏松表层<sup>[9]</sup>, 基质是植物、微生物从中吸取养分借以生存的物质<sup>[10-11]</sup>, 土壤是植物生长的重要基质<sup>[12]</sup>。目前关于植物对喀斯特生境基质的适应性成果多体现在植物对土壤的适应性研究, 植物对喀斯特生境其他生长基质的适应性研究却鲜有报道。喀斯特生境中基质种类复杂多样, 土壤只是其中一种, 目前喀斯特区对于喀斯特土壤质量<sup>[13]</sup>、土壤有机碳<sup>[14]</sup>、土壤养分的空间异质性及形成机制<sup>[15]</sup>、土壤保墒能力<sup>[16]</sup>、土壤养分含量变化规律及其影响因素<sup>[17]</sup>和碳汇<sup>[18]</sup>等方面进行了较为系统的研究, 但是对于生长基质, 如砂、石、枯落物等的研究却鲜有报道。基质作为植物生长的重要载体, 其理化特征对植物生长起到决定性作用,

不应仅仅局限于研究土壤这单一基质，应该拓宽研究对象、研究思维和研究视角，重视所有能够供植物生长的基质研究，这样才能够符合喀斯特生境多样性的需要，才能为喀斯特区植被恢复以及生态系统的恢复重建提供理论依据。草本植物阶段是石漠化区植被恢复的初期阶段，也是最主要的阶段<sup>[19]</sup>。鉴于此，本文选择 4 种草本植物（包括 2 种 C<sub>4</sub> 植物和 2 种 C<sub>3</sub> 植物）为研究对象，从植物形态、发芽率和存活率、 $\delta^{13}\text{C}$  值、光合色素和生物量分配以及基质理化特性等方面，对喀斯特生境中生长基质组成、其理化性质以及草本植物对其的适应性进行研究，旨在揭示喀斯特生境中基质特征，得出植物适应性特征，为喀斯特石漠化区生态系统恢复与重建提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

本试验于 2018 年 7 月 23 日在贵州省溪北社区养牛村（26°27'N, 106°38'E）开始实施，该区森林覆盖率为 35%，海拔为 1 178 m，气候类型为亚热带季风湿润气候，试验期间平均气温为 19.5℃，降雨量为 361.3 mm，无霜期为 148 d，属喀斯特区，其土壤为石灰土、黄壤。

### 1.2 基质主要类型及其选择

通过实地调研与文献查阅发现，喀斯特生境中供试基质类型多样，主要有石灰土、砂、石、枯落物等，其中枯落物层厚度约 2 cm。贵州喀斯特石漠化严重，砂石含量大，有些地区甚至全是砂石，而土壤极少，因此本文选择石灰土、砂、石、枯落物及其混合物作为研究基质。喀斯特生境基质构成可能是一种或多种组分混合，因此，通过采集野外不同喀斯特生境基质，对其进行筛选分类，具体如下：将取自贵阳市花溪区喀斯特生境中的基质样品带回实验室，通过野外调研发现喀斯特生境中有纯的石质砂石，且有植物生长于其中，因此在进行基质组分分离时并未单独按照土壤学中砂石粒径进行划分，而是按照土壤学与土木工程相结合的标准进行砂、石、土粒径划分，简述如下：将采回的样品去除植物根系并过 1 mm 和 5 mm 筛，将其按照砂、石、土进行筛分，其中粒径>5 mm 的为碎石，粒径<5 mm 的为砂（即石质的砂）<sup>[20]</sup>，并将砂分为<1 mm 砂和

1 mm~5 mm 砂，碎石与 1 mm~5 mm 砂用于筛法将其与土壤、<1 mm 砂分离（过筛前把肉眼可见的大于 1 mm 的土质颗粒捏碎），<1 mm 砂和土按照吸管法分离<sup>[21]</sup>；总体上将基质分为土、<1 mm 砂（简称 I 砂）、1 mm~5 mm 砂（简称 II 砂）、<5 mm 的碎石（简称碎石）四种组分，筛分后称重，由于有些基质样品中存在分解或半分解的枯落物，这种分解或半分解的枯落物一方面其质量极小而无法与砂、石、土等的质量进行对比，另一方面筛分非常困难，故未将其分离出来，在分析基质组分质量比时亦未将其计入，但由于基质中有分解或半分解的枯落物，这对植物生长非常有利，是这些基质的组成部分，尤其是枯落物基质是由分解或半分解枯落物与未分解枯落物相混合而构成，故这些基质类型命名时仍有枯落物，所得基质类型及其构成见表 1。表 1 显示：混合基质中含有土、砂、石、枯落物四种组分，有的含有其中一种，有的是多种混合，通过组分构成分析，共有 19 种基质类型。

### 1.3 试验材料

通过多年野外调查及查阅贵州植物志等相关文献，发现狗牙根（*Cynodon dactylon*）、芒草（*Miscanthus sinensis*）、高羊茅（*Festuca elata*）和白三叶草（*Trifolium repens*）为贵州喀斯特区常见的草本植物，广泛分布于各种类型的生境中，具有较强的代表性，因此本文选择该 4 种草本植物为研究对象，其中狗牙根和芒草为 C<sub>4</sub> 植物，白三叶草和高羊茅为 C<sub>3</sub> 植物。试验草种均购买于贵州贵阳，种子均为同一年采摘，花盆口径为 16.8 cm、高 14 cm，所有试验基质取自贵阳市花溪区（26°11'N, 106°27'E）喀斯特山地。

### 1.4 试验设计

本文栽培试验基质按照表 1 中 19 种基质的四种组分质量构成进行试验配制（取样时，有分解或半分解枯落物的基质，由于分解或半分解枯落物质量极少，则按野外调查原位取样，这样确保基质中有分解或半分解枯落物），试验所用砂石取于石质生境，所取土壤为石灰土，由于野外调研发现有分解或半分解枯落物的基质上均覆盖有 2 cm 厚未分解的枯落物，为了保持原真性，试验时在有分解或半分解枯落物的基质上铺置 2 cm 厚未分解枯落物，所取基质组分均来自表 1 中野外调研时的原样地。试验于 2018 年 7 月 23 日—2018 年 12 月 15 日进

表 1 喀斯特生境中基质类型及其构成

Table 1 Types and composition of matrix in karst habitat

基质类型 Matrix type	基质组构成 Composition of matrix components	简称 Abbreviation	备注 Remark
石灰土 Limestone soil	-	石灰土 S	
> 5 mm 碎石 >5 mm limestone debris	-	碎石 G	
1 mm~5 mm 砂 1 mm~5 mm sand	-	II 砂 II	
<1 mm 砂 <1 mm sand	-	I 砂 I	
枯落物 Litter	分解或半分解枯落物与未分解枯落物相混合 Mixture of decomposed or semi-decomposed litter and undecomposed litter	枯落物 L	基质上有 2 cm 厚未分解枯落物 2 cm thick undecomposed litter on matrix
<1 mm 砂+1 mm~5 mm 砂+碎石 <1 mm sand +1 mm~5 mm sand+ limestone debris	2 : 2 : 13	砂石混 GM	
石灰土+枯落物 Limestone soil + litter	石灰土, 其中有分解或半分解枯落物 Limestone soil with decomposed or semi-decomposed litter	土枯 SL	基质上有 2 cm 厚未分解枯落物 2 cm thick undecomposed litter on matrix
碎石+枯落物 Limestone debris + litter	碎石, 其中有分解或半分解枯落物 Limestone debris with decomposed or semi-decomposed litter	碎石枯 GL	基质上有 2 cm 厚未分解枯落物 2 cm thick undecomposed litter on matrix
1 mm~5 mm 砂+枯落物 1 mm~5 mm sand + litter	1 mm~5 mm 砂, 其中有分解或半分解枯落物 1 mm~5 mm sand with decomposed or semi-decomposed litter	II 砂枯 II L	基质上有 2 cm 厚未分解枯落物 2 cm thick undecomposed litter on matrix
<1 mm 砂+枯落物 <1 mm sand + litter	<1 mm 砂, 其中有分解或半分解枯落物 <1 mm sand with decomposed or semi-decomposed litter	I 砂枯 I L	基质上有 2 cm 厚未分解枯落物 2 cm thick undecomposed litter on matrix

续表

基质类型 Matrix type	基质组构成 Composition of matrix components	简称 Abbreviation	备注 Remark
<1 mm 砂+1 mm~5 mm 砂+碎石 +枯落物	<1 mm 砂: 1 mm~5 mm 砂: 碎石为 2 : 2 : 13, 其中有 分解或半分解枯落物	砂石混枯 GML	基质上有 2 cm 厚未 分解枯落物
<1 mm sand +1 mm~5 mm sand+ limestone debris +litter	Mixture of <1 mm sand, 1 mm~5 mm sand and limestone debris at a ratio of 2 : 2 : 13, with decomposed or semi-decomposed litter		2 cm thick undecomposed litter on matrix
<1 mm 砂+1 mm~5 mm 砂+碎石+石灰土			
<1 mm sand +1 mm~5 mm sand +limestone debris + limestone soil	2 : 2 : 13 : 3	土砂石混 SGM	
石灰土+碎石	3 : 13	土碎石 SG	
Limestone soil + limestone debris	3 : 2	土 II 砂 S II	
石灰土+1 mm~5 mm 砂	2 : 3	土 I 砂 S I	
Limestone soil+1 mm~5 mm sand			
<1 mm 砂+石灰土			
<1 mm sand+ limestone soil			
<1 mm 砂+1 mm~5 mm 砂+碎石+石灰土 +枯落物	<1 mm 砂: 1 mm~5 mm 砂: 碎石:石灰土为 2 : 2 : 13 : 3, 其中有分解或半分解枯落物	土砂石混枯 SGML	基质上有 2 cm 厚未 分解枯落物
<1 mm sand +1 mm~5 mm sand+ limestone debris + limestone soil + litter	Mixture of <1 mm sand, 1 mm~5 mm sand, limestone debris and limestone soil at a ratio of 2 : 2 : 13 : 3, with decomposed or semi-decomposed litter		2 cm thick undecomposed litter on matrix
石灰土+碎石+枯落物	石灰土: 碎石为 3 : 13, 其中有分解或半分解枯落物	土碎石枯 SGL	基质上有 2 cm 厚未 分解枯落物
Limestone soil+limestone debris+litter	Mixture of limestone soil and limestone debris at a ratio of 3 : 13, with decomposed or semi-decomposed litter		2 cm thick undecomposed litter on matrix
石灰土+1 mm~5 mm 砂+枯落物	石灰土: 1 mm~5 mm 砂为 3 : 2, 其中有分解或半分解 枯落物	土 II 砂枯 S II L	基质上有 2 cm 厚未 分解枯落物
Limestone soil + 1 mm~5 mm sand + litter	Mixture of limestone soil and 1 mm~5 mm sand at a ratio of 3 : 2, with a decomposed or semi-decomposed litter		2 cm thick undecomposed litter on matrix
<1 mm 砂+石灰土+枯落物	<1 mm 砂: 石灰土为 2 : 3, 其中有分解或半分解枯落物	土 I 砂枯 S I L	基质上有 2 cm 厚未 分解枯落物
<1 mm sand + limestone soil + litter	Mixture of <1 mm sand and limestone soil at a ratio of 2 : 3, with decomposed or semi-decomposed litter		2 cm thick undecomposed litter on matrix

注：为了便于称呼，本文取基质简称，便于图表的表达，下文同。Note: For the convenience of appellation, this paper uses abbreviations in referring to the matrices, for the convenience of chart expression, the same below.

行, 一共 4 种植物, 19 种基质类型, 3 个重复。播种前, 筛选草种, 去除有杂质、虫蚀、裂口以及成熟度低的种子。将各基质按组分质量比混合配置完成, 并将其装进花盆中至同一高度, 将挑选好的植物种子按照每盆 100 粒均匀撒在盆里的浅基质层(预试验显示喀斯特植物生长基质较土壤基质难以适合植物生长, 试验显示以较密的 100 粒较为合适), 在有枯落物的基质上铺置 2 cm 厚未分解枯落物, 所有花盆装的基质最后高度一致。从播种开始, 视生长基质干湿程度浇水, 每次每盆浇透(约 400 mL), 生长过程中不添加任何营养液, 也不喷洒农药。播种后每天观察种子的发芽数并记录, 以种植 21d 后的发芽数计算发芽率(通过观察 21d 时的发芽数基本稳定)。

### 1.5 基质理化性质的测定

基质 pH 采用 pH 计测定<sup>[22]</sup>, 全氮(Total nitrogen, TN)采用扩散法测定<sup>[23]</sup>、全磷(Total phosphorus, TP)采用硫酸—高氯酸消煮法测定<sup>[23]</sup>、全钾(Total potassium, TK)采用火焰光度法测定<sup>[23]</sup>, 持水量(Water holding capacity, WHC)和气体孔隙度(Gas porosity, AP)参照穴盘苗生产原理与技术测定<sup>[24]</sup>。

### 1.6 植物相关指标的测定

以播种 21 d 时的发芽数计算发芽率, 8 月 26 日起每月 26 日测定植物株高、株数、盖度。在试验的第 4 个月根据 Lichtenthaler<sup>[25]</sup>的方法测定总叶绿素(Total chlorophyll, Chl a+b)和类胡萝卜素(Carotenoid, Car)的含量, 并计算类胡萝卜素与叶绿素含量的比值(Car/Chl a+b)。在试验的第 5 个月进行  $\delta^{13}\text{C}$  值测定, 将采集的叶片经过清洗、烘干、冷却、粉碎后, 过 20 目筛密封保存。将处理好的植物样品送自然资源部第三海洋研究所, 用元素分析仪-稳定同位素质谱仪联机(Vario ISOPOTE Cube-Isoprime, Elementar 公司)测定样品中  $\delta^{13}\text{C}$  值。并以 PDB 国际标准作为参考标准,  $\delta^{13}\text{C}$  值按通用标准公式计算<sup>[26]</sup>:

$$\delta^{13}\text{C}(\%) = \left[ \frac{R(^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{sample}})}{R(^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{PDB}})} - 1 \right] \times 1000$$

式中,  $R(^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{PDB}})$  为国际标准物 PDB (Peedee Belemnite) 的碳同位素丰度比值。

试验结束时测定生物量。将每盆植物收割并将

地上部分与地下部分分开, 分别测量植物地上、地下鲜重, 并在 85℃ 下烘干至恒重并称量其干重, 计算地上部分与地下部分生物量比值与根重比(根干重/全株干重(Root weight ratio, RMR))。

### 1.7 数据处理

通过 Microsoft Excel 2017、SPSS 17.0 软件对数据进行统计分析, 采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和 LSD 法检验各基质之间的差异显著性, 用双因素方差分析(two-way ANOVA)检验基质类型和植物类型与各指标之间的差异, 显著性水平设定为  $\alpha=0.05$ 。

## 2 结 果

### 2.1 喀斯特生境的基质类型与特征

表 1 表明喀斯特生境基质组成多样, 按石、砂、土、枯落物的构成喀斯特生境基质类型可分为 19 种(为便于称呼, 本文取其简称, 见表 1, 下文同), 分别为石灰土、碎石、II 砂、I 砂、枯落物、砂石混、土枯、碎石枯、II 砂枯、I 砂枯、砂石混枯、土砂石混、土碎石、土 II 砂、土 I 砂、土砂石混枯、土碎石枯、土 II 砂枯、土 I 砂枯。在混合基质中, 土的占比较小, 碎石占比大。由于喀斯特生境的独特性, 有些基质上层有约 2cm 未分解枯落物。

### 2.2 植物种植前后基质理化性质的变化

由图 1 可知整体上, 植物种植后基质总孔隙度、气体孔隙度(AP)、持水量(WHC)、水气比、pH、全氮(TN)、全磷(TP)均增高, 全钾(TK)含量降低, 基质呈碱性或强碱性; 其中, 白三叶草和狗牙根生长基质的理化性质变化较为明显, 高羊茅和芒草的变化不大; 枯落物的总孔隙度、AP、水气比增加, 但是持水量降低, 说明植物种植后, 枯落物的透气性增强, 空气容量大, 但是保水能力下降; II 砂、碎石枯、土 II 砂的总孔隙度、AP、WHC、水气比与种植前相比下降, 其余基质基本升高, 说明植物对基质理化性质产生一定影响, 种植植物后使得基质的透气性增强, 空气容量增大, 保水能力也有所增强; 基质 TK 含量下降, 说明植物生长过程中吸收 TK, 以促进生长发育。

### 2.3 四种草本植物在不同基质中的发芽率与存活率

整体上, 四种植物的发芽率和存活率在石灰土、

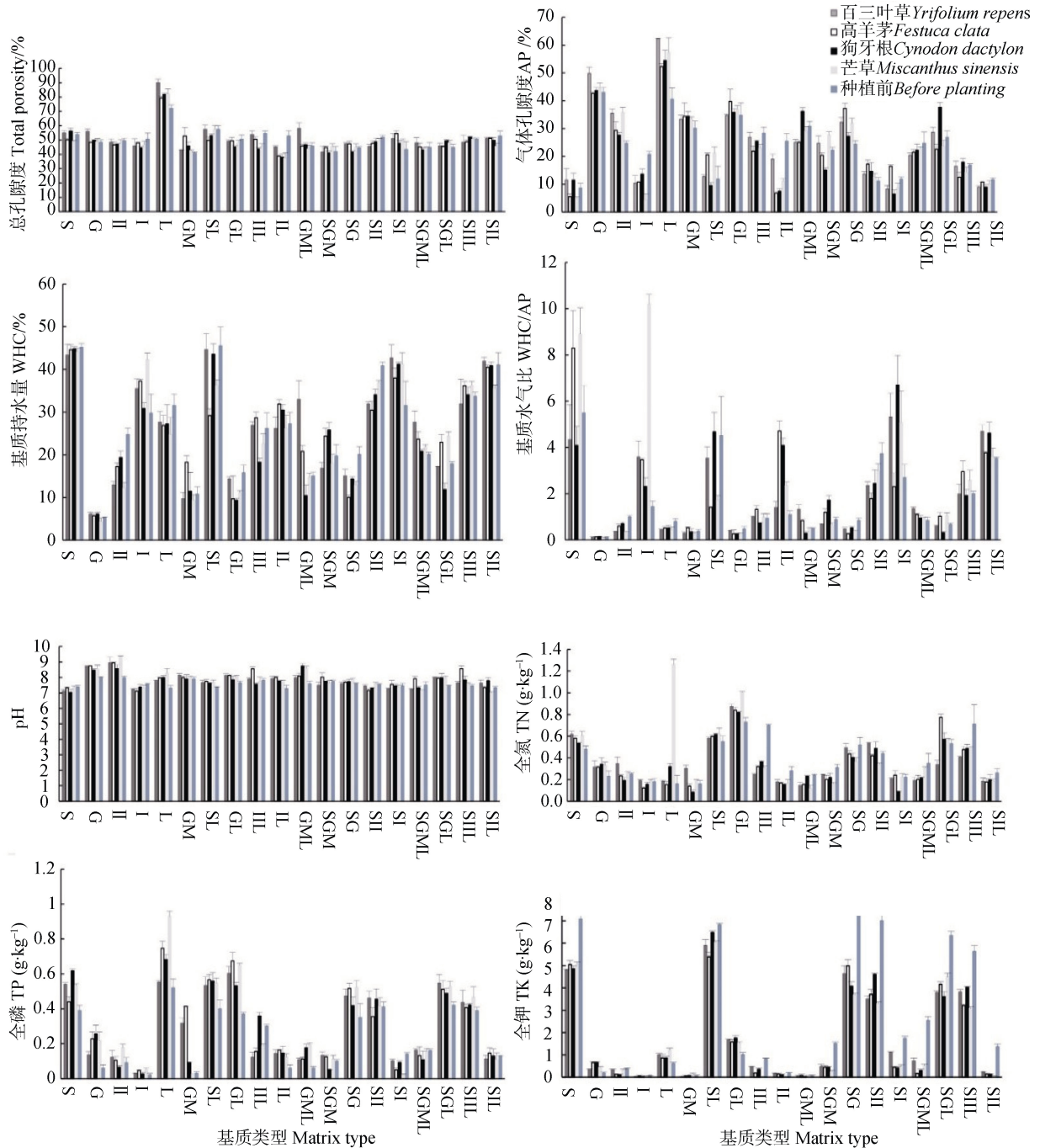


图1 植物种植前后基质理化性质对比

Fig. 1 Comparison of physical and chemical properties of plant matrix before and after planting (mean±SD)

I 砂、II 砂、I 砂枯、土 I 砂中高，其次为土枯、土砂石混、土 II 砂枯、土 I 砂枯、土砂石混枯，碎石枯、砂石混枯、土碎石和土碎石枯中较低，碎石中最低，可能是由于碎石粒径大，总孔隙度大，持水量低导致保水性弱，不利于种子萌发与存活；白三叶草发芽率最高，其次为高羊茅、芒草，狗牙根发芽率最低，狗牙根的存活率最高，其次是芒草、

白三叶草，高羊茅最低。

#### 2.4 植物形态对喀斯特生境基质的适应性

整体上，随着种植时间的变化，白三叶草、高羊茅和芒草的株数逐渐减少，狗牙根株数逐渐增多最后基本保持不变，其中高羊茅株数变化最大，可能与高羊茅是冷季型草坪草，不适应高温气候有关，白三叶草、狗牙根和芒草的株数变化较小；白三叶

草、狗牙根和芒草在石灰土、Ⅱ砂、Ⅰ砂、Ⅰ砂枯、土枯和土Ⅱ砂枯中株数变化较小,在枯落物、Ⅱ砂枯、砂石混枯中变化较大,在碎石和碎石枯中植物株数最少。

整体上,狗牙根株高呈上升趋势,白三叶草和芒草株高呈先升高后下降,而高羊茅的株高则变化多样,在多种基质中呈先增高后降低再升高,其中在石灰土和枯落物中呈降低再升高,可能是由于季节变化,植物枯黄甚至枯死,导致高度降低;四种植物在枯落物、Ⅰ砂枯、土Ⅰ砂和土Ⅱ砂枯中的株高最高,石灰土、Ⅰ砂、土枯、Ⅱ砂枯、砂石混枯和土砂石混枯中较高,Ⅱ砂、砂石混和土碎石中较低,碎石和碎石枯中最低,说明植物不适应于碎石和碎石枯。

由图 2 可知整体上,随时间变化,各基质中白三叶草、狗牙根和芒草的盖度逐渐升高,高羊茅的变化多样,在大多数基质中呈迅速下降再逐渐升高,在枯落物、土枯、砂石混中升高,这说明高羊茅对不同基质的适应性不同;白三叶草盖度最高,其次为芒草、狗牙根,高羊茅最低;四种植物盖度在Ⅰ砂、Ⅱ砂枯、Ⅰ砂枯和土Ⅰ砂中最高,石灰土、枯落物、土枯、土Ⅱ砂、土Ⅱ砂枯中较高,Ⅱ砂、砂石混、砂石混枯中较低,碎石和碎石枯中最低,说明四种植物不适合在碎石和碎石枯中生长。

### 2.5 四种植物在不同基质中的生物量

图 3 显示整体上,四种植物在Ⅰ砂、枯落物、Ⅰ砂枯和土碎石枯中地上生物量与地下生物量之比最大,石灰土、Ⅱ砂、砂石混枯、Ⅱ砂枯中较大,砂石混、土Ⅰ砂、土Ⅱ砂枯和土Ⅰ砂枯中较小,碎石和土碎石中最小;其中狗牙根的最大,其次为三叶草、高羊茅,芒草最小,说明狗牙根主要采取地上部分生长的生长策略;四种植物的 RMR 在Ⅱ砂、砂石混、土枯、砂石混枯和土Ⅱ砂枯中最大,石灰土、枯落物、土砂石混、土Ⅱ砂、土Ⅰ砂和土砂石混枯中较大,Ⅱ砂枯、Ⅰ砂枯和土碎石枯中较小,碎石、Ⅰ砂中最小;芒草的 RMR 最大,其次为高羊茅、三叶草,狗牙根最低,说明芒草的根系发达,主要采取地下部分生长的生长策略。

### 2.6 植物光合色素对斯特生境中基质的适应性

图 4 表明四种植物的 Chl a+b 在土砂石混、土Ⅱ砂、土Ⅰ砂、土砂石混枯和土Ⅰ砂枯中高,其次为石灰土、Ⅱ砂、Ⅰ砂、土枯和Ⅰ砂枯,碎石中

低;其中白三叶草的 Chl a+b 含量最高,其次为狗牙根和芒草,高羊茅最低,说明白三叶草和狗牙根吸收和转化光能的作用强,更有利于光合作用;四种植物的 Car/Chl (a+b) 在Ⅰ砂、Ⅱ砂、枯落物、Ⅰ砂枯、土Ⅱ砂枯和土Ⅰ砂枯中大,土枯、砂石混枯、土砂石混枯和土Ⅰ砂中较大,土碎石枯和土碎石中较小,碎石中最小;狗牙根的 Car/Chl (a+b) 最大,其次为芒草、三叶草,高羊茅最小,说明狗牙根和芒草的光保护系统更容易增强,以能够适应恶劣生境。

### 2.7 四种植物在不同基质中的水分利用特性

表 2 表明整体上,芒草的  $\delta^{13}\text{C}$  值最高,其次为狗牙根、白三叶草,高羊茅最低,说明芒草和狗牙根水分利用效率高,白三叶草和高羊茅低;白三叶草的  $\delta^{13}\text{C}$  值在Ⅰ砂、土砂石混、土砂石混枯和碎石枯中大,石灰土、Ⅱ砂和Ⅱ砂枯中较大,土碎石和土Ⅱ砂枯中较小,碎石、土Ⅱ砂和土碎石中最小;芒草的在砂石混中最大,土Ⅱ砂和土砂石混中较大,土碎石和土Ⅱ砂枯中较小,Ⅰ砂枯中最小;狗牙根的在Ⅰ砂中最大,土Ⅰ砂和土砂石混枯中较大,Ⅰ砂枯、土碎石和土砂石混中较小,Ⅱ砂中最小;高羊茅的在枯落物中最大,土Ⅰ砂和土砂石混中较大,砂石混枯和土碎石中较小,土枯中最小;以上表明植物叶片  $\delta^{13}\text{C}$  值跟植物种类与生长基质有关;说明不同植物、不同生长基质,植物水分利用效率不同,反映出喀斯特生境的复杂性及植被恢复的艰巨性。

## 3 讨论

四种植物对喀斯特不同生长基质的适应性表明:植物可以生长在非土壤的石质基质中,并且非传统意义上如泥炭、草炭、蛭石等基质<sup>[27]</sup>,而是取决于喀斯特区自然状态下的生长基质。同时表明试验基质中存在植物生长所必需的营养元素,如氮、磷、钾等,图 1 表明了 19 种基质中砂质基质的 TN、TP、TK 含量低于含土壤的基质。综上所述,喀斯特生境中生长基质的概念可概括为喀斯特生境中能够为种子萌发或者植物生长提供条件的一种或者多种物质混合的介质。其内涵特征是有的营养元素含量(氮磷钾)较低,有的营养元素含量较高,类型丰富多样(如本研究得出了 19 种类型),有土、少土、极少土或无土,且非土壤生长基质占比高,基



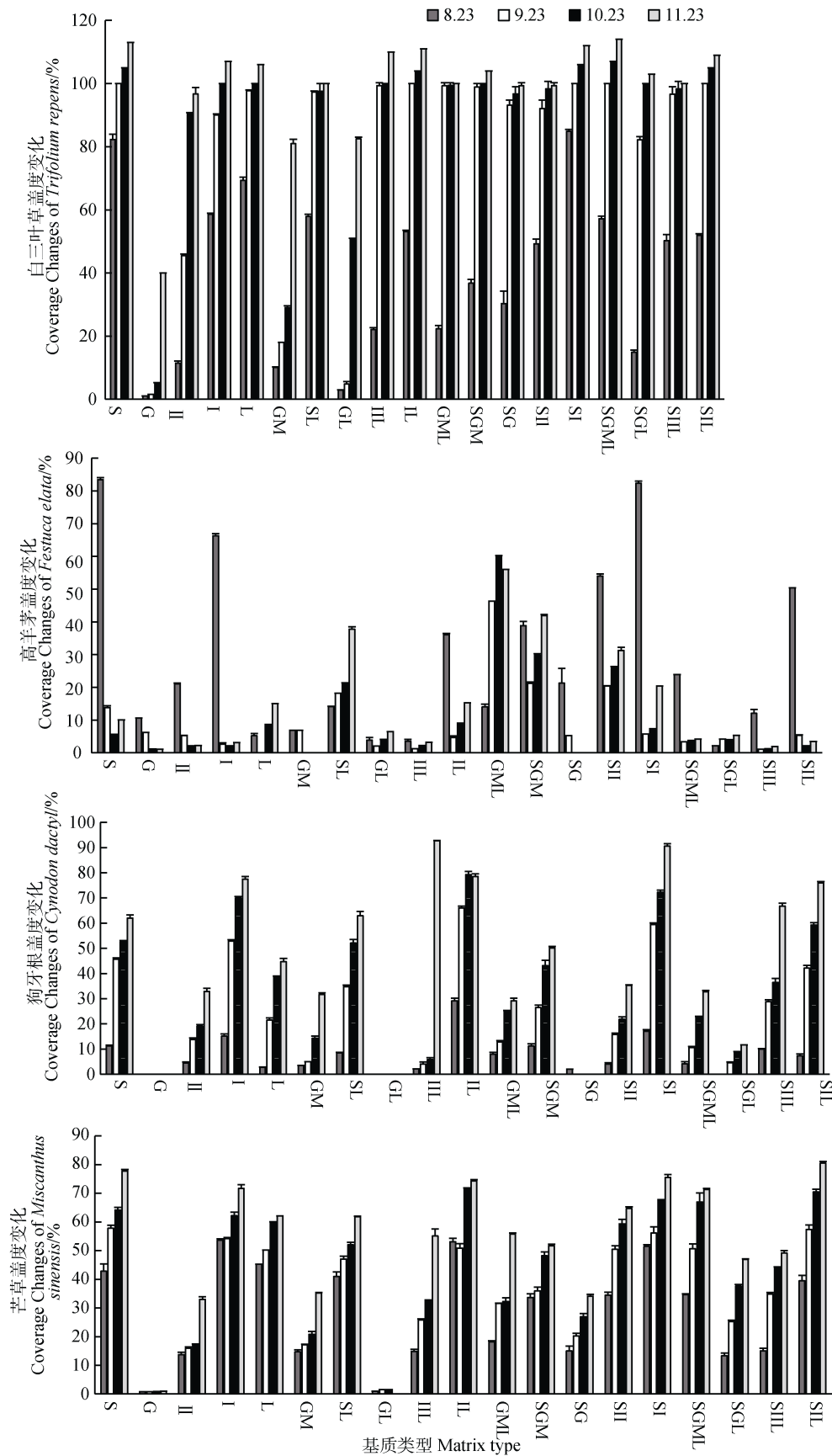


图 2 四种植物在不同基质中的盖度变化

Fig. 2 Coverage of the plant relative to species and matrix ( mean±SD )

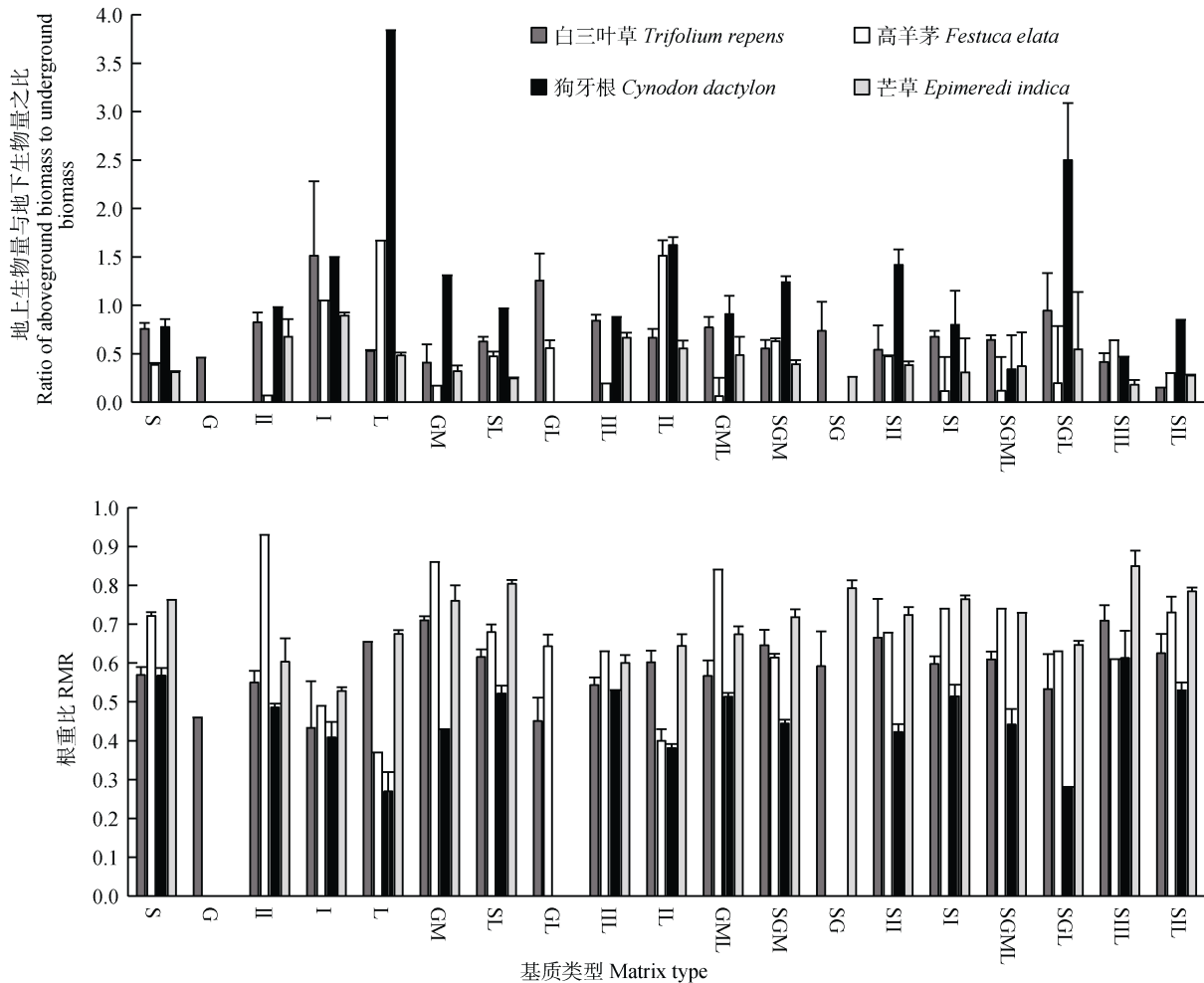


图3 四种草本植物在不同基质中的生物量之比

Fig. 3 Biomass ratio of the plant relative to species and matrix (mean±SD)

质 pH 呈中性或偏碱性, 极少数偏酸性。经植物物种、基质类型双因素方差分析表明: 不同植物物种对试验结果中的发芽率、存活率、株数、株高、盖度、根重比、叶绿素含量等指标数值大小影响均存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 不同基质类型对上述试验指标亦存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 同时植物物种与基质类型还存在交互效应 ( $P < 0.05$ ), 且其交互效应对上述指标亦存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。这说明在喀斯特区植物物种的选择及基质类型是喀斯特生态系统恢复的两个重要因素, 在将来的理论与实践应该同时引起足够重视。

基质作为植物生长的必要载体, 它不仅是植物种子及幼苗萌发和生存的场所, 也是为植物生长发育提供所需水分、养分的介质, 因此基质类型对植物的生长发育有着重要作用。基质的物理和化学特性直接影响基质的蓄水能力、透水性及通气性, 间

接影响着基质的肥力和植物生长状况<sup>[28]</sup>。通过对基质理化特性的分析, 得出种植植物后, 整体上基质总孔隙度、AP、WHC、水气比、pH、TN、TP 增高, TK 含量降低, 基质呈碱性或强碱性, 说明基质的透气性增强, 空气容量增大, 保水能力增强, 在降雨或者浇水后能蓄存更多的水分, 延长干旱季节水分的蒸发时间, 从而为植物根系吸收水分创造有利条件, 反映了植物根系对生长基质具有调节作用; 氮和磷是限制植物生长的重要元素, 对植物生长发育具有重要作用, 而氮和磷在土壤中极易被固定, 且有效性低, 大气中的氮元素被基质吸收, 导致其中的 TN 含量增加, 而 19 种基质中土壤占比低, 砂石占比高, 淋溶作用会产生较多的磷元素进入基质中, 使基质中磷含量增加<sup>[29-30]</sup>, 因而大量的氮和磷在基质中积累, 导致氮和磷含量增加, 其中白三叶草根系具有根瘤菌, 具有明显的固氮作用, 因此其基质

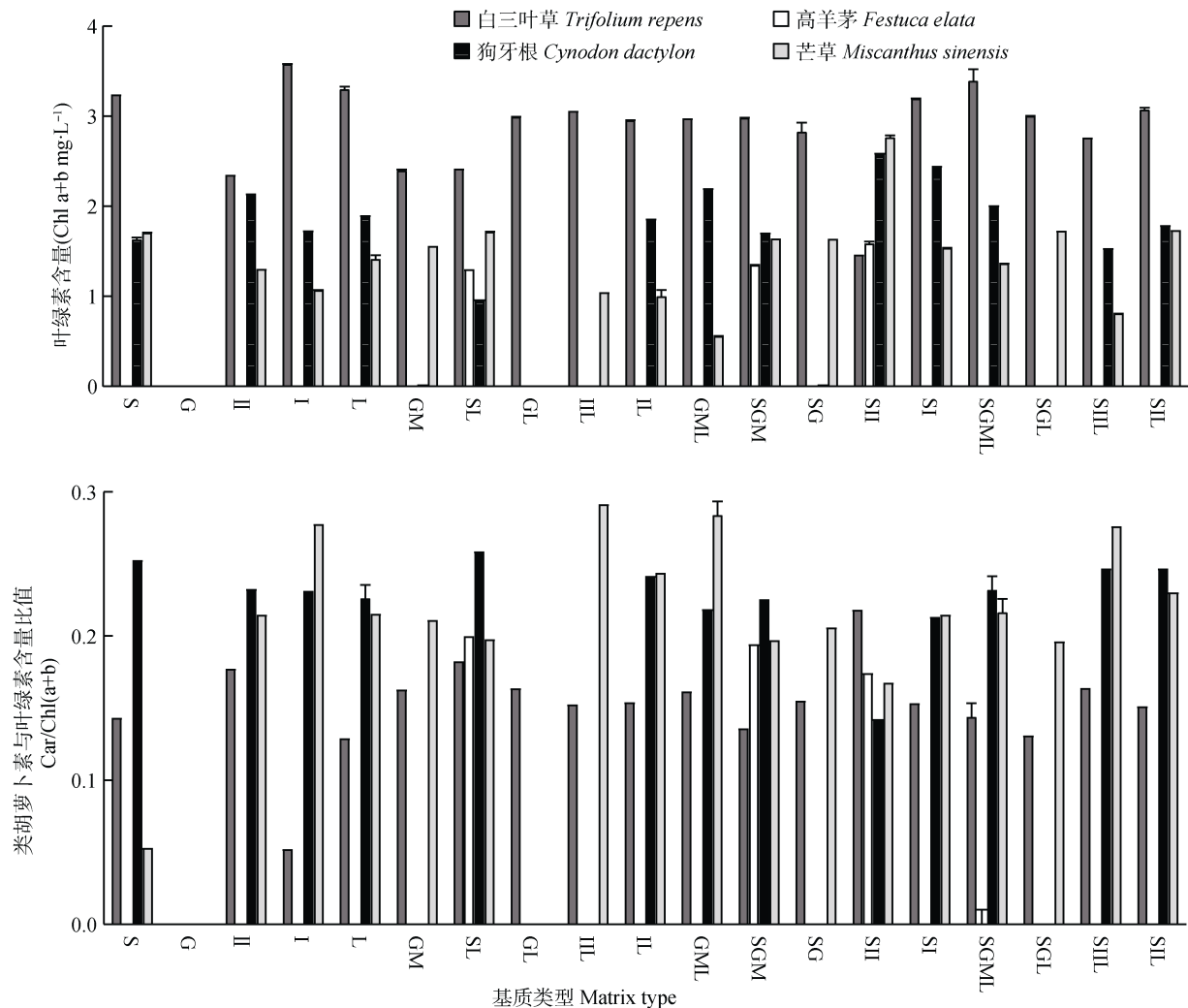


图4 四种植物在不同基质中的叶绿素含量 (Chl a+b)、类胡萝卜素与叶绿素含量的比值 (Car/Chl (a+b))

Fig. 4 Total chlorophylls (Chl a+b), the ratio of carotenoids to total chlorophylls (Car/Chl (a+b)) of 4 herb plants in different matrices (mean±SD)

中 TN 含量明显增加；同时，基质中养分因子也受到植被及其他环境因子的影响，如土壤水分、降雨、土壤质地等，也会导致基质中出现 TN、TP 含量增加现象<sup>[29]</sup>；本研究与王霖娇等<sup>[29]</sup>的研究结果一致，但与 Mulder 和 Elser<sup>[31]</sup>、Zhang 等<sup>[32]</sup>的研究结果不一致，上述分析显示喀斯特生境中植物生长基质特性变化的多样性与特殊性；TK 含量降低说明植物在生长过程中吸收钾以促进其生长发育。综上可知，植物在生长过程中会对其生长基质进行调节，以创造更有利于其生长的外界环境。因此在喀斯特石漠化区为了维持或提高植物生长基质的肥力或地力，应该按照科学原理，在合适的基质上种植适应的植物，从而形成良性循环的基质生态系统，确保植被生态系统得以恢复与重建。

植物的发芽率和存活率能够直接反映植物的生长状况。整体上，白三叶草的发芽率最高，狗牙根存活率最高，四种植物在石灰土、I 砂、土 I 砂中发芽率和存活率高，在碎石枯中低，但在碎石中存活率均为 0，说明植物在碎石中难以存活，而植物却能在非土壤基质的其他生长基质中有较高的生存率和发芽率，反映了在喀斯特极端生境中植物仍然具有较高的适应性；分析原因是石灰土、I 砂、土 I 砂的总孔隙度和持水量大，基质疏松、透气性和保水性能好，其他与碎石、II 砂等混合的基质，因碎石与 II 砂的粒径较大，从而基质的孔隙度与持水量增大<sup>[33]</sup>，使基质保持一个好的透气性与保水能力，种子也能在其中萌发与存活，而碎石和碎石枯的粒径过大、气体孔隙度高，保水性差，易造成水分缺

表 2 四种植物叶片的  $\delta^{13}\text{C}$  值Table 2  $\delta^{13}\text{C}$  in leaves of the plant relative to species and matrix/‰

基质类型	白三叶草	芒草	狗牙根	高羊茅
Matrix type	<i>Trifolium repens</i>	<i>Miscanthus sinensis</i>	<i>Cynodon dactylon</i>	<i>Festuca elata</i>
S	-30.39	-13.08	-14.87	—
G	—	—	—	—
II	-30.18	-13.38	-16.47	—
I	-29.49	-13.04	-13.56	—
L	-30.29	-13.02	-14.55	-30.73
GM	—	-8.88	—	—
SL	-30.41	-13.07	-14.56	-32.06
GL	-30.09	—	—	—
II L	-30.19	-12.58	—	—
I L	-30.7	-19.04	-15	—
GML	-30.32	-13.19	-14.3	-31.81
SG	-29.72	-13.59	-15.01	-31.92
S II	-30.51	-13.48	—	—
S I	-30.28	-12.95	-14.47	-31.73
SGM	-29.56	-13.47	-14.39	-31.67
SGML	-29.93	-13.4	-15.08	—
SGL	-30.58	-13.36	—	—
S II L	-30.23	-13.76	-14.58	—
S I L	-30.13	-13.18	-14.58	—

注：“—”表示在相对应的基质中已经落叶而未测定的植物叶片  $\delta^{13}\text{C}$  值。Note: “—” refers to the undetermined  $\delta^{13}\text{C}$  values of plant leaves that have been defoliated in the corresponding matrix.

失，植物生长没有足够的水分，且草本植物根系较浅，很难吸收更深层次的水分和养分，因此植物在碎石和碎石枯中难以存活。生物量是植物对不同基质生长适应的综合体现，也是对环境整体适应的结果<sup>[34-35]</sup>，同时生物量的分配格局在一定程度上可以反映植物受到水分胁迫的生存策略，植物受到干旱胁迫时通常将较多的生物量分配到地下部分以促进根系生长获取必要的水分来维持其生命活动的正常进行<sup>[36-37]</sup>，因此生物量累积值可以为植物对不同基质生长适应提供可靠的标准。本试验中狗牙根的地上生物量与地下生物量之比最大，其次为白三叶草、高羊茅，芒草最小（四种植物的 RMR 刚好相反），这反映了四种植物的生存策略不同，狗牙根和白三叶草地上部分生长更为发达，采取分配更多的水分及养分到地上部分，以便获得更好的地上资源，而

芒草和高羊茅根系更为发达，地上光合产物向根部运输的比例高于地上部分，使根系能吸收更多的营养和水分来维持植物生存，体现植物对逆境的适应性。叶绿素是植物进行光合作用重要物质，在植物对光能的吸收和转换中起着重要作用。本研究中，四种植物的 Chl a+b 和 Car/Chl (a+b) 在土枯、土 I 砂、土 I 砂枯中高，碎石中最低，且白三叶草的 Chl (a+b) 最高，其次为狗牙根、芒草，高羊茅最低，说明四种植物在土枯、土 I 砂、土 I 砂枯中能够吸收更多的光能，有利于光合作用，在碎石和碎石枯中则降低叶绿素含量以增强光保护能力，使其能够在逆境中生长；植物的 Car/Chl (a+b) 比值反映植物的光保护能力<sup>[32-33]</sup>，狗牙根的 Car/Chl (a+b) 最大，其次芒草、三叶草，高羊茅最小，说明狗牙根和芒草更有利于增强光保护能力，反映狗牙根和

芒草更能适应恶劣环境,揭示植物光合色素的分配反映植物对于不同基质采用的光合机制不同。 $\delta^{13}\text{C}$  值既由植物本身的生物学特性决定,又受到外界环境因素的影响<sup>[38]</sup>。四种草本植物的  $\delta^{13}\text{C}$  值符合韩家懋等<sup>[39]</sup>的研究结果,芒草的  $\delta^{13}\text{C}$  值最大,其次为狗牙根,白三叶草和高羊茅的较小,说明  $\text{C}_4$  植物水分利用效率远远高于  $\text{C}_3$  植物,更适合在缺乏水分的逆境中生长;同一植物在不同生长基质中  $\delta^{13}\text{C}$  值也有所不同,白三叶草在 I 砂、土砂石混、土砂石混枯和碎枯中大,狗牙根在 I 砂中最大,说明植物叶片  $\delta^{13}\text{C}$  值跟植物种类与生长基质有关。

综上所述,整体上,在不同基质中,四种植物通过调节自身的形态、生理特征,如株高、盖度、Chl a+b 含量、生物量分配及水分利用效率等来适应不同的生长基质,对于碎石或者砂石占比较高的基质采取降低 Chl a+b 含量,增强水分利用效率,扩大根系,增强光保护能力,吸收更多的水分和养分,以维持自身生长。植物通过调节基质理化特性创造更有利于其生长的基质环境。四种植物能在除土壤外的其他基质中生长良好,但在碎石和碎石枯中难以存活。整体上,四种植物对石灰土、I 砂、土枯、土 I 砂和土 II 砂的适应性强,对 II 砂、枯落物、砂石混枯、土 II 砂枯、土 I 砂枯的较强,对砂石混、II 砂枯、土 I 砂、土砂石混、土砂石混枯的较差,对碎石、碎石枯的最差。其中狗牙根和芒草对于 19 种基质的适应性强,白三叶草较强,高羊茅适应性差,因此,在喀斯特石漠化恢复初期,可以优先选择种植狗牙根和芒草。

## 4 结 论

植物种植前后基质理化性质发生改变,基质呈碱性或强碱性;不同植物对于生长基质的适应性调节方式不同,通过调整生物量的分配格局来适应不同的生存环境,同时调节光合色素以适应不同基质的环境机制, $\text{C}_4$  植物狗牙根和芒草的水分利用效率高,更能适应恶劣的生长基质,植物叶片  $\delta^{13}\text{C}$  值不仅与植物叶片有关,还与生长基质有关,建议在喀斯特区植被恢复初期多选用  $\text{C}_4$  草本植物;四种植物在石灰土、I 砂、土枯、I 砂枯和土 II 砂适应性强,其次为砂石混、II 砂枯、土 I 砂、土砂石混、土砂石混枯等,在碎石、碎石枯、土碎石、土碎石枯中

差;整体上,狗牙根和芒草生长适应性强,白三叶草较强,高羊茅最差,因此在喀斯特石漠化区恢复进程中,可以选择优先种植芒草和狗牙根;本研究基于单一土壤基质研究拓展到喀斯特生长基质研究,拓宽了研究理论和研究视角,对喀斯特区植被生态恢复具有重要意义。综上所述,研究喀斯特区四种草本植物及其基质优先选择,对喀斯特石漠化区生态恢复和重建有重要意义,同时也能为喀斯特石漠化区草本植被恢复提供物种选择。

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] Liu C Q. Biogeochemical processes and cycling of nutrients in the earth's surface: Cycling of nutrients in soil-plant systems of karstic environments, Southwest China[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [ 2 ] Zhu S Q. Study on Karst forest ecology[M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 1993. [朱守谦. 喀斯特森林生态研究[M]. 贵阳: 贵州科学技术出版社, 1993.]
- [ 3 ] Li J Q. Forest ecology[M]. Beijing: High Education Press, 2010. [李俊清. 森林生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.]
- [ 4 ] Ou Z Y, Cao Y Y, Tan Z Q, et al. Effects of drought on photosynthesis and resistance physiology of *Excentrodendron hsiemnu* seedlings in Karst habitat[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37 ( 11 ): 3270—3276. [欧芷阳, 曹艳云, 谭长强, 等. 干旱胁迫对喀斯特生境蚬木幼苗光合特性及抗性生理的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37 ( 11 ): 3270—3276.]
- [ 5 ] Chen C. Ecophysiological mechanisms of forage shrubs resistant to drought&cold in Karst areas[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. [陈超. 喀斯特地区饲用灌木抗旱抗寒性的生理生态学机制研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.]
- [ 6 ] Zhang Z F, You Y M, Huang Y Q, et al. Effects of drought stress on the photosynthesis and growth of *Cyclobalanopsis glauca* seedlings: A study with simulated hierarchical Karst water supply[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31 ( 9 ): 2197—2202. [张中峰, 尤业明, 黄玉清, 等. 模拟岩溶水分供应分层的干旱胁迫对青冈栎光合特性和生长的影响[J]. 生态学杂志, 2012, 31 ( 9 ): 2197—2202.]
- [ 7 ] Ji F T, Li N, Deng X. Calcium contents and high calcium adaptation of plants in Karst areas of China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2009, 33 ( 5 ): 926—935. [姬飞腾, 李楠, 邓馨. 喀斯特地区植物钙含量特征与高钙适应方式分析[J]. 植物生态学报, 2009, 33 ( 5 ): 926—935.]
- [ 8 ] Liu C C, Liu Y G, Guo K. Ecophysiological adaptations to

- drought stress of seedlings of four plant species with different growth forms in Karst habitats[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(10): 1070—1082. [刘长成, 刘玉国, 郭柯. 四种不同生活型植物幼苗对喀斯特生境干旱的生理生态适应性[J]. 植物生态学报, 2011, 35(10): 1070—1082.]
- [ 9 ] Huang C Y, Xu J M. Soil science[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2010. [黄昌勇, 徐建明. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.]
- [ 10 ] Wang G F. Landscape floristics[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2018. [王国夫. 园林花卉学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2018.]
- [ 11 ] Wan C G. Floriculture[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2008. [宛成刚. 花卉学[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2008.]
- [ 12 ] Pan B H. Landscape floristics[M]. Changsha: National Defense University of science and Technology Press, 2007. [潘百红. 园林花卉学[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2007.]
- [ 13 ] Fu Y H, Huang Z S, Yu L F, et al. Analysis on the soil quality of different typical underground root habitat types in Karst areas[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(3): 67—73. [符裕红, 黄宗胜, 喻理飞, 等. 岩溶区典型根系地下生境的土壤质量分析[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3): 67—73.]
- [ 14 ] Huang Z S, Fu Y H, Yu L F. Characteristic evolution of soil organic carbon pool with the process of natural restoration of Karst forest vegetation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(2): 306—314. [黄宗胜, 符裕红, 喻理飞. 喀斯特森林植被自然恢复过程中土壤有机碳库特征演化[J]. 土壤学报, 2013, 50(2): 306—314.]
- [ 15 ] Liu L, Zeng F P, Song T Q, et al. Spatial heterogeneity of soil nutrients in Karst area's Mulun National Nature Reserve[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(7): 1667—1673. [刘璐, 曾馥平, 宋同清, 等. 喀斯特木论自然保护区土壤养分的空间变异特征[J]. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1667—1673.]
- [ 16 ] Li A D, Li W J, Yang R, et al. Capacity of soil moisture conservation of different microhabitats under different mulching techniques in Karst area[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2010, 8(5): 55—60, 66. [李安定, 李苇洁, 杨瑞, 等. 喀斯特地区不同覆盖下小生境土壤保墒能力[J]. 中国水土保持科学, 2010, 8(5): 55—60, 66.]
- [ 17 ] Liang S C, Zhang S M, Yu F H, et al. Small-scale spatial cross-correlation between ramet population variables of *Potentilla reptans* var. *sericophylla* and soil available phosphorus[J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(4): 613—618. [梁士楚, 张淑敏, 于飞海, 等. 绢毛匍匐委陵菜与土壤有效磷的小尺度空间相关分析[J]. 植物生态学报, 2007, 31(4): 613—618.]
- [ 18 ] Zhang W, Wang K L, Chen H S, et al. Use of satellite information and GIS to predict distribution of soil organic carbon in depressions amid clusters of Karst peaks[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(3): 601—606. [张伟, 王克林, 陈洪松, 等. 典型喀斯特峰丛洼地土壤有机碳含量空间预测研究[J]. 土壤学报, 2012, 49(3): 601—606.]
- [ 19 ] Yu L F, Zhu S Q, Ye J Z, et al. Dynamics of a degraded Karst forest in the process of natural restoration[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2002, 38(1): 1—7. [喻理飞, 朱守谦, 叶镜中, 等. 退化喀斯特森林自然恢复过程中群落动态研究[J]. 林业科学, 2002, 38(1): 1—7.]
- [ 20 ] Standard production group. Standard for quality and inspection method of sand and stone for ordinary concrete (JGJ 52-2006) [S]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2008. 5. isbn978-7-80227-398-6. [标准制作组. 普通混凝土用砂石质量及检验方法标准(JGJ 52-2006) [S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2008. 5. ISBN978-7-80227-398-6.]
- [ 21 ] Liu G S. Soil physical and chemical analysis and profile description[M]. Beijing: China Standard Press, 1996. [刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996.]
- [ 22 ] Qiao S Y. Instructions for soil physical and chemical properties experiments[M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 2012: 47—50. [乔胜英. 土壤理化性质实验指导书[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 2012: 47—50.]
- [ 23 ] Bao S D. Soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press. 2002. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社. 2002.]
- [ 24 ] Styer R C, Koranski D S. Principle and technology of point-plate seedling production[M]. Liu B, et al. trans. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 80—83. [Roger C. Styer, David S. Koranski. 穴盘苗生产原理与技术[M]. 刘滨, 等译. 北京: 化工工业出版社, 2007: 80—83.]
- [ 25 ] Lichtenthaler H K. Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes[M]//Methods in Enzymology. Amsterdam: Elsevier, 1987: 350—382
- [ 26 ] Rong L, Wang S J, Du X L, et al. Relationship among leaf anatomical characters and foliar  $\delta^{13}\text{C}$  values of six woody species for Karst rocky desertification areas[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2008, 44(10): 29—34. [容丽, 王世杰, 杜雪莲, 等. 喀斯特峡谷石漠化区6种常见植物叶片解剖结构与  $\delta^{13}\text{C}$  值的相关性[J]. 林业科学, 2008, 44(10): 29—34.]
- [ 27 ] Meng X M. The concept of growing media and its application in the protected agriculture in China[J]. Journal of Shanxi Agricultural University ( Natural Science Edition), 2016, 36(3): 155—159, 165. [孟宪民. 专业基质的概念及其在我国设施农业中的意义

- [J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2016, 36(3): 155—159, 165.]
- [ 28 ] Liu J. Study on characteristics of vegetation and soil under different ecological rehabilitation measures in Karst area[D]. Guiyang: Guizhou University, 2017. [刘娟. 喀斯特不同生态修复措施下植被与土壤特征研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2017.]
- [ 29 ] Wang L J, Wang P, Sheng M Y. Stoichiometric characteristics of soil nutrient elements and its influencing factors in typical karst rocky desertification ecosystems, Southwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(18): 6580—6593. [王霖娇, 汪攀, 盛茂银. 西南喀斯特典型石漠化生态系统土壤养分生态化学计量特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2018, 38(18): 6580—6593.]
- [ 30 ] Qin C X, Peng C, Guo Q, et al. Effects of sugarcane and peanut intercropping on available phosphorus and pH value in red soils[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(11): 137—140. [秦昌鲜, 彭崇, 郭强, 等. 甘蔗花生间作对红壤有效磷、pH 值的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(11): 137—140.]
- [ 31 ] Mulder C, Elser J J. Soil acidity, ecological stoichiometry and allometric scaling in grassland food webs[J]. Global Change Biology, 2009, 15(11): 2730—2738.
- [ 32 ] Zhang C, Tian H Q, Liu J Y, et al. Pools and distributions of soil phosphorus in China[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2005, 19(1): doi:10.1029/2004GB002296.
- [ 33 ] Zhao M, Wang W L, Guo M M, et al. Erosion of slopes of loess soil stacks different in limestone debris content[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57. DOI:10.11766/trxb201905220129. [赵满, 王文龙, 郭明明, 等. 不同砾石含量壤土堆积体坡面侵蚀特征研究[J]. 土壤学报, 2020, 57. DOI:10.11766/trxb201905220129.]
- [ 34 ] Zhang X X, Yin X L, Li H L, et al. Effect of salt stress on the biomass and photosynthetic characteristics of *Ulmus pumila* L. strains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(21): 7258—7265. [张晓晓, 殷小琳, 李红丽, 等. NaCl 胁迫对不同白榆品系生物量及光合作用的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(21): 7258—7265.]
- [ 35 ] Zong N, Duan C, Geng S B, et al. Effects of warming and nitrogen addition on community production and biomass allocation in an alpine meadow[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(1): 59—67. [宗宁, 段呈, 耿守保, 等. 增温施氮对高寒草甸生产力及生物量分配的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(1): 59—67.]
- [ 36 ] Baquedano F J, Castillo F J. Comparative ecophysiological effects of drought on seedlings of the Mediterranean water-saver *Pinus halepensis* and water-spenders *Quercus coccifera* and *Quercus ilex*[J]. Trees, 2006, 20(6): 689—700.
- [ 37 ] Elsheery N I, Cao K F. Gas exchange, chlorophyll fluorescence, and osmotic adjustment in two mango cultivars under drought stress[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2008, 30(6): 769—777.
- [ 38 ] Dong X, Li Y H, Xin Z M, et al. Variation in leaf traits and leaf  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  content in *Nitraria tangutorum* along precipitation gradient[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(10): 3700—3709. [董雪, 李永华, 辛智鸣, 等. 唐古特白刺叶性状及叶片  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$  沿降水梯度的变化特征[J]. 生态学报, 2019, 39(10): 3700—3709.]
- [ 39 ] Han J M, Wang G A, Liu D S. Appearance of  $\text{C}_4$  plants and global changes[J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9(1): 233—243. [韩家懋, 王国安, 刘东生.  $\text{C}_4$  植物的出现与全球环境变化[J]. 地学前缘, 2002, 9(1): 233—243.]

(责任编辑: 檀满枝)