

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2022.02.021

# 石灰岩山地不同生境淡竹的养分特征及其生理适应

吴姝瑾<sup>1,2</sup>, 梁宽<sup>1</sup>, 樊燕<sup>1</sup>, 苏田<sup>1,2</sup>, 胡姝珍<sup>1,2</sup>,  
陈永镇<sup>1,2</sup>, 俞社保<sup>1</sup>, 施建敏<sup>1,2\*</sup>

(1. 江西农业大学林学院, 江西 南昌 330045; 2. 江西省竹子种质资源与利用重点实验室, 江西 南昌 330045)

**摘要:** [目的] 石灰岩山地土壤高度异质、养分分布不均, 探寻石灰岩山地优势种淡竹 (*Phyllostachys glauca* McClure) 养分分配特征及低 P 适应机制, 为喀斯特植被管理和植物资源利用提供理论参考。[方法] 通过对赣西北石灰岩山地连续土、半连续土和零星土 3 种土被生境淡竹林设置样地进行调查, 测定并分析淡竹各构件 N、P 含量。[结果] 表明: (1) 随着裸岩率增加, 土壤全 N 含量增加, 而 3 种生境的全 P 含量均较低; (2) 淡竹植株 N 含量随裸岩率上升而增加, 在零星土生境下最高; P 含量随裸岩率增加而减少, 零星土生境植株的 N:P 大幅上升, P 限制加剧, 但叶的 N:P 保持相对稳定; 淡竹各构件中 N 含量随裸岩率增加呈缓慢上升趋势, P 含量呈下降趋势且除叶片外其余构件均大幅下降。(3) 不同生境淡竹 N、P 分配格局不同, 淡竹各构件的 N 分配比例在 3 种生境下没有差异 (鞭除外); 半连续土和零星土淡竹叶片 P 分配比例显著高于连续土, 而半连续土竹秆的 P 分配比例显著低于连续土。[结论] 植株 N、P 含量与土壤 N、P 供应水平正相关, 在土壤 N 供应充足而 P 供应匮乏的情况下, 淡竹通过减少秆的 P 分配而提高叶片的分配量, 以保证叶片养分需求维持植株正常生长, 提高逆境下的适合度。

**关键词:** 淡竹; 石灰岩山地; 异质性; 土壤养分; 分配格局

**中图分类号:** S718.43; S795.7

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-1498(2022)02-0180-07

氮 (N)、磷 (P) 是植物体内维持细胞结构和功能的重要生命元素, 是限制陆生植物生产力的两个关键因子<sup>[1]</sup>。植物的 N、P 来源于土壤, 在养分缺乏的生境中, 植物对养分的吸收和合理分配是适应生境的重要方式<sup>[2-3]</sup>。石灰岩生境是典型的喀斯特系统, 其土壤浅薄、异质性高, 土壤养分供应不平衡<sup>[4]</sup>。石灰岩生境土壤有效氮含量在  $0.21 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  左右, 有效磷含量为  $0.003 \sim 0.005 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  (低于  $0.01 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  缺磷标准)<sup>[5]</sup>。研究认为, 石灰岩土壤缺磷, 限制植物生长的养分通常是磷而不是氮<sup>[6-8]</sup>。

近年来, 研究者对喀斯特生境的异质性、土壤

养分供应、植物养分特征进行了研究。高华端<sup>[9]</sup>以裸岩率的高低将石灰岩生境分为三类: 连续土 (CS), 裸露率 < 30%; 半连续土 (SCS), 裸露率 30% ~ 50%; 零星土 (SS), 裸露率 > 50%。吴海勇等<sup>[10]</sup>在桂西北峰丛洼地区研究发现, 在高裸岩率区域内, 土壤 N 含量增加; 张忠华等<sup>[11]</sup>、李恩香等<sup>[12]</sup>研究岩溶植被均发现, 随着裸岩率的增高, 土壤中的全 P 含量随之降低。还有研究对喀斯特植物养分进行了分析, 张亚冰等<sup>[13]</sup>发现, 同一种植物在喀斯特地区生境下叶片的 N 含量比在非喀斯特生境下高, 随着裸岩率上升植物叶片的 N 含

收稿日期: 2021-08-06 修回日期: 2021-12-30

基金项目: 国家自然科学基金 (32060380、31660198); 中央财政林业科技推广示范项目 JXTG [2022] 02; 江西省林业局林业科技创新专项 [2021] 03

作者简介: 吴姝瑾, 硕士研究生。主要研究方向: 竹子生理生态。Email: 1006059415@qq.com

\* 通讯作者: 施建敏, 教授, 博导。主要研究方向: 树木生理生态。Email: edulis@163.com

量呈上升趋势;周俊妞等<sup>[14]</sup>在桂林喀斯特岩溶石山区域对50种植物叶片养分特征进行探究,发现在喀斯特地区植物叶片中的N含量和P含量呈显著的正相关;原雅楠等<sup>[15]</sup>发现,榿树(*Torreya grandis* Fort. et Lindl.)不同器官N、P变化趋势一致且叶片中N、P含量最高;庞丽等<sup>[16]</sup>发现,随裸岩率上升蕨类植物对土壤中的P利用率提高。然而,在土壤养分供应迥异(N充裕而P缺乏)的喀斯特生境,植物如何进行体内养分分配调节尚不明确,含量丰富和缺乏的元素适应特征是否一致亦不清楚。

在赣西北石灰岩山地有大面积淡竹(*Phyllostachys glauca* McClure)纯林成片分布,甚至在裸岩率高达60%的生境下仍能生长<sup>[17]</sup>。由此可见,淡竹对石灰岩生境具有很强的适应能力,是研究植物对石灰岩生境养分适应的理想材料。为此,本文依据高华端<sup>[9]</sup>的生境分类,研究不同石灰岩生境N、P养分供应特征,比较分析石灰岩优势种淡竹在低P高N生境中的体内养分分配特征与差异,以期探析淡竹在石灰岩生境养分适应机制,为喀斯特植被管理和植物资源利用提供理论依据。

## 1 研究区概况

瑞昌市位于江西省西北部(29°23'~29°51' N, 115°06'~115°44' E),北临长江,幕阜山余脉自西向东绵延全境,地形多为低山、丘陵。气候属中亚热带北缘湿润性季风气候,年均气温16.6℃,极端最高气温41.2℃,极端最低气温-13.4℃,年均降水量1394 mm,年均日照时数1890 h,无霜期260 d<sup>[18]</sup>。研究区有5600 hm<sup>2</sup>天然淡竹成片分布于石灰岩山地,其它树种仅零星点缀其中<sup>[19-20]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 试验设计及取样方法

于2014年7月连续晴天,选择海拔、坡向一致的零星土、半连续土、连续土3种生境,每生境3次重复。每类生境按年龄分层法取9株淡竹,同时在每株取样淡竹附近用土钻随机取3份土壤样品作为混合样,取样深度为0~30 cm。淡竹采用全株收获法并分为地上部叶(Le)、枝(Br)、秆(Cu)和地下部莖(Su)、鞭(Rh)、根(Ro)6

个构件样品进行烘干处理,测定N、P含量。地下部构件取样标准为:莖为从竹秆颈部至与竹鞭相连的部分;鞭以待测分株为中心,通过挖掘确认与竹鞭相连的左右分株位置后,截取来鞭和去鞭各一半;根包括莖根和鞭根两部分。

### 2.2 指标测定

称取烘干样品(土样250 mg,植物样品150 mg),加1.5 g 催化剂(硫酸钾:硫酸铜=10:1)后再加5 mL 浓硫酸,消煮完成后移入100 mL 容量瓶定容,摇匀静置。

**2.2.1 氮测定** 取1 mL 消煮液于50 mL 容量瓶,加1 mL EDTA-甲基红,加入适量水,用酸碱调节pH,使溶液由红色变为淡黄色,再加5 mL 酚和5 mL 次氯酸钠摇匀,定容1 h后在625 nm 比色。

全株N含量=(叶N含量×叶生物量+枝N含量×枝生物量+秆N含量×秆生物量+莖N含量×莖生物量+鞭N含量×鞭生物量+根N含量×根生物量)/全株生物量

叶片N含量占比=(叶生物量×叶N含量)/(全株N含量×全株生物量)×100%

其他构件(枝、秆、莖、鞭、根)N含量占比计算方式与叶相同。

**2.2.2 磷测定** 取10 mL 消煮液于50 mL 容量瓶,加1滴2,4-二硝基酚,加入适量水,用酸碱调节pH,使溶液由无色变成淡黄色,再加5 mL 钼锑抗试剂,摇匀,定容30 min后在880 nm 比色。

全株P含量和构件P含量占比计算与上述N的计算方式一致。

### 2.3 生物吸收系数计算

生物吸收系数(A)表示植物从环境中吸收和积累化学元素的能力,淡竹N、P生物吸收系数计算公式为<sup>[21]</sup>:

$$A = (C_p/C_n) \times 100$$

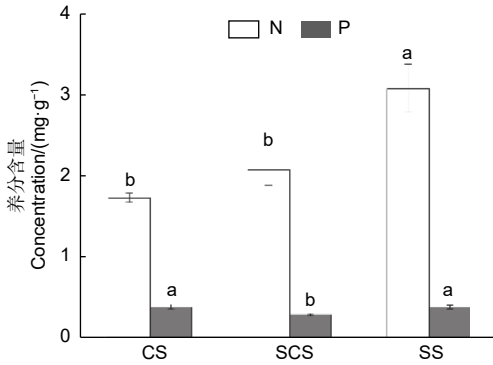
式中:A为生物吸收系数,C<sub>p</sub>为植物体内某元素含量,C<sub>n</sub>为土层元素含量。

## 3 研究结果

### 3.1 3种生境土壤氮、磷含量

在3种不同生境下,随着裸岩率的增加,土壤的全N含量逐渐增加(图1)。零星土生境全N含量与连续土、半连续土生境间差异显著( $p < 0.05$ ),呈现零星土(3.08±0.29 mg·g<sup>-1</sup>)>半连续土

( $2.07 \pm 0.18 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) > 连续土 ( $1.73 \pm 0.06 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) 的趋势; P 含量在连续土、零星土生境与半连续土生境间差异显著 ( $p < 0.05$ ), 呈现连续土 ( $0.382 \pm 0.03 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) > 零星土 ( $0.381 \pm 0.02 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) > 半连续土 ( $0.29 \pm 0.01 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) 的趋势 (图 1)。



注: 不同小写字母代表同一元素含量不同生境间差异显著 ( $p < 0.05$ )。CS: 连续土生境, SCS: 半连续土生境, SS: 零星土生境, 下同。

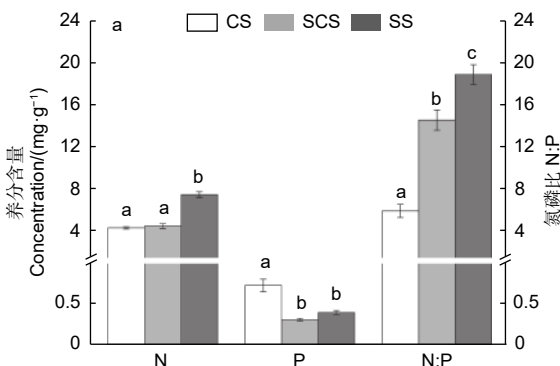
Notes: The different lowercase letters represent significant differences in nutrient concentrations between different habitats ( $p < 0.05$ ); CS: continuous soil habitat, SCS: semi-continuous soil habitat, SS: sporadic soil habitat, the same below.

图 1 石灰岩山地淡竹林 3 种生境土壤的全氮、全磷含量

Fig. 1 Concentrations of soil nitrogen and phosphorus in three habitats in limestone mountains

### 3.2 不同生境植株水平氮、磷含量及氮磷比

在 3 种不同生境, 淡竹 N、P 含量及 N:P 呈现出不同的规律 (图 2a), 零星土生境下植株全 N 含量显著 ( $p < 0.05$ ) 高于连续土和半连续土, 连续土生境下植株 P 含量显著 ( $p < 0.05$ ) 高于半连续土和零星土, 由此 N:P 呈现出随裸岩率增大而增大的趋势, 3 种生境下 N:P 均差异显著



( $p < 0.05$ )。

淡竹对 N 元素的吸收系数在连续土、半连续土、零星土分别为 251.67、217.97、243.70; 对 P 元素的吸收系数随着裸岩率的增加不断减小, 连续土、半连续土、零星土的数值分别为 191.83、108.85、104.38 (图 2b)。在 3 种生境下, N 和 P 的吸收系数均大于 100, 即 2 种元素都是在淡竹体内累积, 但随着裸岩率的增加, 淡竹对 P 元素的吸收能力逐渐减弱。

### 3.3 不同生境淡竹构件水平氮、磷含量及氮磷比

3.3.1 N 含量变化 图 3a 表明: 在 3 种生境中, 淡竹不同构件 N 含量的变化趋势为: 除鞭外, 叶、枝、秆、莖、根的 N 含量变化趋势均服从随裸岩率升高而升高, 其中, 叶的 N 含量最高, 在连续土、半连续土、零星土生境分别为  $17.36 \pm 0.60$ 、 $19.49 \pm 0.51$ 、 $20.41 \pm 0.37 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ; 秆的 N 含量在 3 种生境下均最低, 连续土、半连续土、零星土分别为  $2.36 \pm 0.12$ 、 $2.02 \pm 0.20$ 、 $3.11 \pm 0.36 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。叶片和鞭中的 N 含量在连续土与半连续土间差异显著 ( $p < 0.05$ )。

3.3.2 P 含量变化 不同生境中, 除叶外, 淡竹各构件 P 含量变化趋势和 N 含量相反, 随裸岩率的升高而降低 (图 3b), 从零星土到连续土生境, 叶片 P 含量总体上也是降低趋势, 但其降低幅度小于其他构件, 半连续土比连续土生境降低了 16.32%, 而零星土比半连续生境上升了 2.46%; 枝、秆、莖、鞭的 P 含量在连续土与半连续土生境间差异显著 ( $p < 0.05$ )。3 种生境仍是叶 P 含量最高, 连续土、半连续土、零星土分别为  $1.15 \pm 0.16$ 、 $0.96 \pm 0.19$ 、 $0.98 \pm 0.24 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。淡竹所有构件的 P 含量均在连续土生境下最高, 叶、枝、秆、莖、

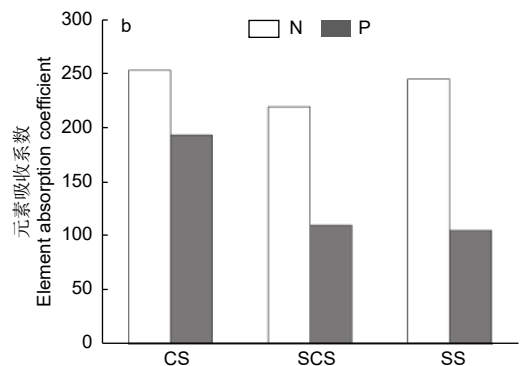


图 2 不同生境淡竹全株氮、磷含量及 N:P (a) 和氮磷吸收系数 (b)

Fig. 2 Concentrations of nitrogen, phosphorus and N:P (a), and N and P absorption coefficients (b) of *Phyllostachys glauca* in three habitats

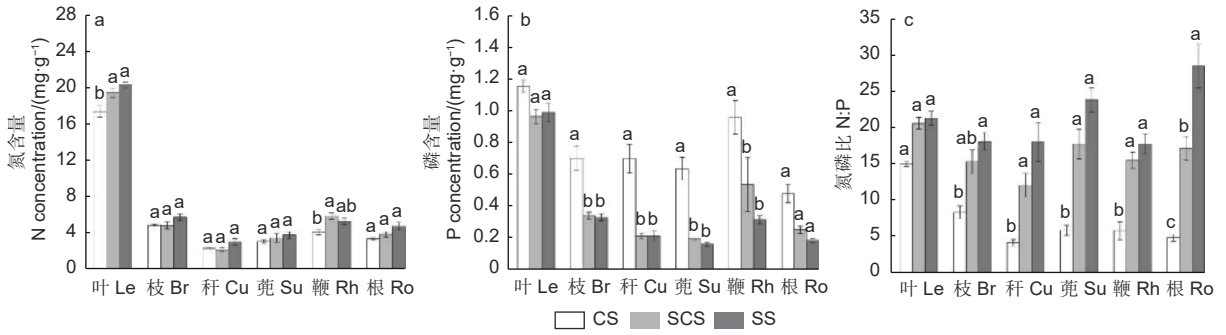


图 3 不同生境下淡竹各构件 N、P 含量及其 N:P

Fig. 3 N and P concentrations and N:P of *Phyllostachys glauca* in three habitats

鞭、根分别为  $1.15 \pm 0.16$ 、 $0.70 \pm 0.32$ 、 $0.69 \pm 0.38$ 、 $0.63 \pm 0.30$ 、 $0.96 \pm 0.45$ 、 $0.48 \pm 0.25 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

**3.3.3 N:P 变化** 图 3c 表明: 随裸岩率升高, 淡竹各构件的 N:P 逐步升高。在连续土生境下的秆、鞭、根的 N:P 与零星土生境之间显著差异 ( $p < 0.05$ ); 根的 N:P 在 3 种生境之间均存在显著差异 ( $p < 0.05$ )。所有构件中只有叶片在 3 种生境下 N:P 保持相对稳定, 且 3 种生境下 N:P 差异不显著 ( $p > 0.05$ )。

### 3.4 不同生境淡竹构件 N、P 分配格局

N、P 含量在植物体内的不同构件中分配占比不同。N 在叶中占比最大, 其次为秆、枝、根、

鞭、鞭 (图 4a); P 在叶片和秆中的占比较大, 其次为枝、鞭、根、鞭 (图 4b)。N、P 随生境变化在各构件中的分配策略也不同。随裸岩率的升高, N 含量在叶中的占比分别为 49.55%、51.71%、48.28%, 变化幅度较小, 而在秆、鞭、根中的占比呈上升趋势。随裸岩率的升高, P 含量在叶片中的占比呈上升趋势, 从连续土到零星土分配比例从 25.81% 上升至 44.26%, 差异显著 ( $p < 0.05$ ); 同时, 秆中的 P 占比从连续土到半连续土由 40.48% 降至 26.74%, 差异显著 ( $p < 0.05$ ); 枝、鞭、根中的 P 占比亦有不同程度降低。

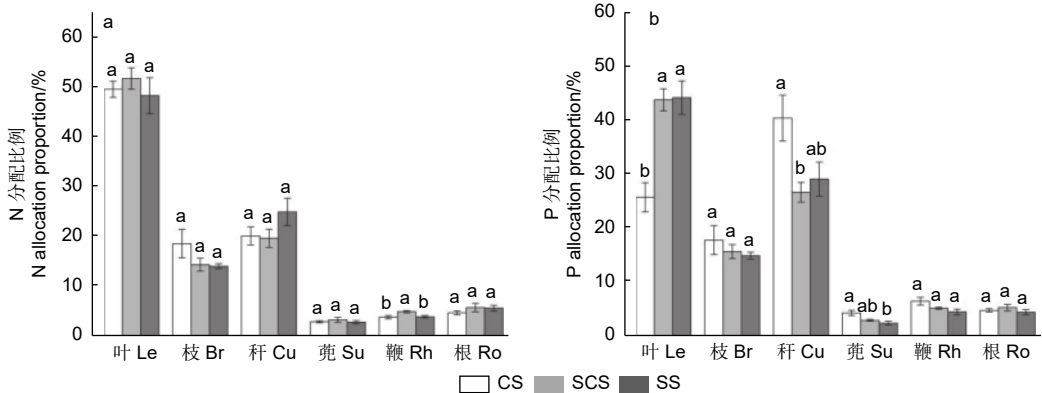


图 4 不同生境淡竹构件 N (a)、P (b) 分配格局

Fig. 4 Distribution patterns of nitrogen(a) and phosphorus(b) of *Phyllostachys glauca* in three habitats

## 4 讨论

### 4.1 淡竹主要养分含量与分配特征

在赣西北地区的石灰岩山地上, 淡竹林大面积广泛分布<sup>[19,22]</sup>。从连续土到零星土, 随着裸岩率上升, 土壤 N 含量升高, 淡竹全株的 N 含量增加。在 N 供应充足的情况下, 植株保证叶片中的 N 含量, 然后将多余的 N 分配给秆等其他构件。相比

之下, 土壤 P 含量与 N 截然相反, 3 种生境的 P 含量均较低。植物 P 主要来源于土壤<sup>[9,23]</sup>, 土壤缺磷使淡竹植株 P 含量下降, 且各构件的 P 含量均呈不同程度的下降 (图 3), 其中, 叶和根的 P 含量下降较平缓, 保持在一个相对稳定的值。

研究表明, 在植物的各构件中, 叶片的 N、P 含量均高于其他构件<sup>[24-25]</sup>。李祥栋等<sup>[26]</sup>在薏苡抽

穗期探究其养分分配,发现整株中叶片的 N 占比最高,所占比例为 46.59%~48.75%,且地上部分 N 的积累量占整株的 91.36%~91.12%。于钦民等<sup>[27]</sup>对杉木的养分分配开展研究,发现地上部分 N 积累量最高可达 80%,其中,叶的 N 积累量为全株 40%~60%,P 在叶片中积累量同样最高,占 35%~45%。与其他植物的养分分配类似,淡竹的 N、P 主要分配在地上部分的叶、枝、秆中,而地下部分的比例较小,不超过 16.35%;随着生境裸岩率升高,N 供应充足而 P 供应缺乏,淡竹叶片的 N 分配比例变化较小,叶片 P 的分配比例大幅增加,枝、秆等其余构件中 P 的分配比例均下降(图 4)。这表明植物在 P 缺乏生境下,有限的 P 在植物体内进行重新分配,枝、秆中的 P 被转移出来分配到更关键的构件上。王雪梅等<sup>[28]</sup>研究表明,在养分匮乏的情况下,车桑子(*Dodonaea viscosa* (L.) Jacq.)把更多的养分集中分配给叶片,保证叶片光合需要以维持植物生长,提高逆境下的适合度。该观点在本研究中得以印证,零星土生境淡竹降低秆中的 P 分配比例而提高叶片中的分配量,以适应土壤的低 P 供应。

陆地生态系统中,N、P 的有效性通常限制了植物生长,N:P 是表征群落养分限制的重要指标<sup>[29]</sup>。研究表明,N:P<14,植物受 N 限制;N:P>16,植物受 P 限制;介于二者之间时,则植物受 N 或 P 或 N:P 影响<sup>[30]</sup>。通过植物各构件的化学计量特征,可以探究不同生境下植物内稳态特征<sup>[31]</sup>、植物特性<sup>[32]</sup>、物种组成以及多样性<sup>[33]</sup>。本研究中,随生境裸岩率的增加,淡竹植株 N:P 不断上升,表现为连续土(5.93±0.16)<半连续土(14.52±0.40)<零星土(18.83±0.48),表明受 P 限制程度越来越高;同时,叶片 N:P 却没有因为土壤缺磷程度的上升而发生急剧变化,从连续土到零星土的 N:P 保持相对稳定,表现为:连续土(15.12±0.32)<半连续土(20.70±0.80)<零星土(21.41±0.97)。可见,淡竹在受 P 限制的情况下,通过调节构件的分配满足叶片的 N、P 含量稳定以保证正常生长需求。

#### 4.2 淡竹 N、P 分配格局比较

在 3 种生境下,淡竹 N、P 在植物体内的分配格局存在差异。从连续土到零星土,土壤中的 N 含量随裸岩率上升而上升,但土壤可利用 P 始终保持在较低水平。吴海勇等<sup>[10]</sup>研究发现,喀斯

特高裸岩率区域土壤面积有限,凋落物高度聚集,造成了土壤中的 N 含量增高,这与本文的研究结果一致。姜沛沛等<sup>[34]</sup>研究发现,地表土壤对 P 具有吸附作用,伴随着水土流失造成土壤 P 含量下降。另外,喀斯特地区土壤中 P 多以钙磷(Ca-P)的形式被固定,能被植物直接利用的 P 含量约 1~8 mg·kg<sup>-1</sup><sup>[35-36]</sup>。对于石灰岩生境土壤 N 充足而 P 缺乏的特点<sup>[37]</sup>,淡竹采用了不同的分配格局策略以适应环境:从连续土到零星土,各构件的 N 分配比例相对稳定,不同生境间差异不显著(图 4a);P 的分配格局则不同,其在秆中的分配占比从连续土生境的 40.48% 下降到半连续土、零星土的不及 30%,而在叶片中的分配占比从 25.81% 上升 40% 以上(图 4b)。这表明,淡竹将更多的 P 从秆中转移分配至叶片中,以保证叶片对 P 的需求,以缓解 P 缺乏对植物的影响。

叶是植物新陈代谢最旺盛的部位,光合作用需要多种光合酶的参与,而叶片光合速率与叶氮含量有密切的关系<sup>[38]</sup>。在光合途径中更高效的利用 N,是抵御缺 P 有害影响的一种机制<sup>[39]</sup>。郭延平等<sup>[40]</sup>研究发现,叶片在缺 P 条件下光合作用受到光抑制。本研究中,随着裸岩率的增加,淡竹增加其叶片中的 N 含量,旺盛的光合作用促进叶片中 C 的积累使其快速生长繁殖<sup>[41]</sup>;而当土壤 P 缺乏时,淡竹通过合理调节分配更多 P 至叶片来满足生理需求,以适应生境的养分变化。张天霖等<sup>[42]</sup>在粤北地区开展植物器官养分研究后认为,在养分缺乏的生境下,优势物种通过复杂的内在协调机制来维持其在群落中的优势地位。课题组前期对不同生境淡竹的生长研究发现,从连续土到零星土生境,淡竹平均胸径分别为 2.47、2.63、3.01 cm,株高分别为 5.64、5.95、6.67 m,胸径和株高均在零星土生境下达到最大,即零星土生境下淡竹长势好,且生物量高<sup>[43]</sup>。本研究发现,淡竹在零星土生境会调节 N、P 养分分配以保证叶片生理需求,这一行为可能是支撑淡竹在 P 缺乏生境应对胁迫保持良好长势的一个重要生理机制。

## 5 结论

养分的吸收和合理分配是植物应对养分匮乏生境的重要适应方式。本研究对赣西北石灰岩山地连续土、半连续土和零星土 3 种土被生境优势种淡竹进行调查,研究发现植株 N、P 含量与土壤 N、

P 供应水平正相关,在土壤 N 供应充足而 P 供应匮乏的情况下,淡竹通过减少秆中的 P 分配而提高叶片的分配量,以保证叶的养分需求维持整株的正常生长,提高逆境下的适合度。研究结果揭示了淡竹在缺磷生境下的生存策略,为喀斯特植被管理和植物资源利用提供了理论参考。

## 参考文献:

- [1] Sterner R W, Elser J J. Ecological stoichiometry: The biology of elements from molecules to the biosphere[M]. Princeton, N J, USA. Princeton: Princeton University Press, 2002: 225-226.
- [2] Liu C N, Huang Y, Wu F, et al. Plant adaptability in karst regions[J]. Journal of Plant Research, 2021, 134(5): 1-18.
- [3] 钟巧连,刘立斌,许鑫,等.黔中喀斯特木本植物功能性状变异及其适应策略[J].植物生态学报,2018,42(5): 562-572.
- [4] 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.
- [5] 黎祖尧,杨光耀,杜天真,等.石灰岩土壤特点及对淡竹的影响[J].竹子研究汇刊,1997,16(2): 49-52,48.
- [6] Ülo N, Kalevi K. Co-limitation of plant primary productivity by nitrogen and phosphorus in a species-rich wooded meadow on calcareous soils[J]. Acta Oecologica, 2005, 28(3): 345-356.
- [7] Liu F, Wang S J, Luo H B, et al. Vegetation succession with Karst desertification and its impact on water chemistry of runoff[J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(1): 26-32.
- [8] 蔡国俊,锁盆春,张丽敏,等.黔南喀斯特峰丛洼地3种建群树种不同器官C、N、P化学计量特征[J].贵州师范大学学报:自然科学版,2021,39(5): 36-44.
- [9] 高华端.贵州陡坡退耕地立地分类系统研究[J].水土保持研究,2003,10(4): 76-79.
- [10] 吴海勇,曾馥平,宋同清,等.喀斯特峰丛洼地土壤有机碳和氮素空间变异特征[J].植物营养与肥料学报,2009,15(5): 1029-1036.
- [11] 张忠华,胡刚,祝介东,等.喀斯特森林土壤养分的空间异质性及其对树种分布的影响[J].植物生态学报,2011,35(10): 1038-1049.
- [12] 李恩香,蒋忠诚,曹建华,等.广西弄拉岩溶植被不同演替阶段的主要土壤因子及溶蚀率对比研究[J].生态学报,2004,24(6): 1131-1139.
- [13] 张亚冰,吕文强,周传艳,等.贵州月亮山5个优势树种叶片与土壤生态化学计量特征[J].水土保持研究,2017,24(5): 182-188.
- [14] 周俊妞,黄婧,马姜明,等.桂林喀斯特石山50种常见植物叶片养分特征及其适应性差异[J].生态学报,2020,40(17): 6126-6134.
- [15] 原雅楠,李正才,王斌,等.榿树种内C、N、P生态化学计量特征研究[J].林业科学研究,2019,32(6): 73-79.
- [16] 庞丽,吴霞,邹琼丽,等.喀斯特地区常见蕨类植物中氮磷元素分布及其与土壤供给的关系[J].东北林业大学学报,2021,49(6): 53-57.
- [17] Sardans J, Peñuelas J. Drought changes nutrient sources, content and stoichiometry in the bryophyte *Hypnum cupressiforme* Hedw. growing in a Mediterranean forest[J]. Journal of Bryology, 2008, 30(1): 59-65.
- [18] 刘苑秋,王芳,柯国庆,等.江西瑞昌石灰岩山区退耕还林对土壤有机碳的影响[J].应用生态学报,2011,22(4): 885-890.
- [19] 杜天真,黎祖尧,杨光耀,等.石灰岩地区淡竹立地条件研究[J].江西农业大学学报,1994,16(1): 82-87.
- [20] 樊燕,黎祖尧,范承芳,等.石灰岩山地淡竹林演替序列的群落物种多样性[J].生态学杂志,2014,33(12): 3238-3244.
- [21] 宁晓波,项文化,方晰,等.贵阳花溪石灰岩、石灰土与定居植物化学元素含量特征[J].林业科学,2009,45(5): 34-41.
- [22] 樊燕,郭春兰,方楷,等.石灰岩山地优势种淡竹生物量分配的影响主因研究[J].广西植物,2016,36(10): 1172-1178.
- [23] 曾德慧,陈广生.生态化学计量学:复杂生命系统奥秘的探索[J].植物生态学报,2005,29(6): 141-153.
- [24] Zhang Q, Xiong G, Li J, et al. Nitrogen and phosphorus concentrations and allocation strategies among shrub organs: the effects of plant growth forms and nitrogen-fixation types[J]. Plant and Soil, 2018, 427(1): 305-319.
- [25] 符裕红,喻理飞,黄宗胜,等.岩溶区根系地下生境优势植物及其养分利用特征[J].生态环境学报,2020,29(12): 2337-2345.
- [26] 李祥栋,戴焱,潘虹,等.薏苡氮磷钾养分吸收分配及利用特征[J].中国农学通报,2021,37(9): 9-15.
- [27] 于钦民,徐福利,王渭玲.氮、磷肥对杉木幼苗生物量及养分分配的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(1): 118-128.
- [28] 王雪梅,闫帮国,史亮涛,等.车桑子幼苗生物量分配与叶性状对氮磷浓度的响应差异[J].植物生态学报,2020,44(12): 1247-1261.
- [29] Koerselman W, Meuleman A M F. The vegetation N: P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. Journal of Applied Ecology, 1996, 33(6): 1441-1450.
- [30] Güsewell S. N: P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance[J]. New Phytologist, 2004, 164(2): 243-266.
- [31] 邓博文,许瑶瑶,陈逸飞,等.中国针叶林优势树种叶片氮磷钾生态化学计量特征及内稳态分析[J].林业科学研究,2020,33(6): 81-87.
- [32] 符义稳,田大栓,牛书丽,等.氮磷添加和干旱对高寒草甸优势植物叶片化学计量的影响[J].北京林业大学学报,2020,42(5): 115-123.
- [33] Elser J J, Bracken M, Cleland E E, et al. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems[J]. Ecology Letters, 2007, 10(12): 1135-1142.
- [34] 姜沛沛,曹扬,陈云明,等.陕西省3种主要树种叶片、凋落物和土壤N、P化学计量特征[J].生态学报,2017,37(2): 443-454.
- [35] Geekiyana N, Goodale U M, Cao K, et al. Plant ecology of tropical and subtropical karst ecosystems[J]. Biotropica, 2019,

- 51(5): 626-640.
- [36] 于姣姐, 殷丹阳, 吴佳美, 等. 林木低磷胁迫适应机制研究进展[J]. 世界林业研究, 2017, 30 (1): 18-23.
- [37] 樊 燕. 石灰岩山地淡竹 (*Phyllostachys glauca*) 表型可塑性研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2016.
- [38] 李育花, 刘 晓, 岳 明. 太白山独叶草无性系分株营养元素含量对异质环境的响应[J]. 应用生态学报, 2008, 19 (8): 1676-1681.
- [39] 李 颢, 党晓宏, 汪 季, 等. 吉兰泰盐湖周边荒漠植物养分、叶片功能性状及适应策略研究[J]. 生态环境学报, 2021, 30 (4): 708-717.
- [40] 郭延平, 陈屏昭, 张良诚, 等. 缺磷胁迫加重柑橘叶片光合作用的光抑制及叶黄素循环的作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9 (3): 359-363.
- [41] Gao J, Wang F, Hang H, *et al*. Improved leaf nitrogen reutilisation and Rubisco activation under short-term nitrogen-deficient conditions promotes photosynthesis in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) at the seedling stage[J]. Functional Plant Biology, 2018, 45(8): 840-853.
- [42] 张天霖, 邱治军, 吴仲民, 等. 粤北针阔混交林不同器官碳氮磷钾的生态化学计量特征[J]. 林业科学研究, 2021, 34 (2): 149-157.
- [43] 梁 宽, 樊 燕, 冯火炬, 等. 不同石灰岩生境淡竹非结构性碳水化合物浓度及分配特征[J]. 林业科学, 2019, 55 (6): 22-27.

## Nutrient Characteristics and Physiological Adaptation of *Phyllostachys glauca* at Different Habitats in Limestone Mountains

WU Shu-jin<sup>1,2</sup>, LIANG Kuan<sup>1</sup>, FAN Yan<sup>1</sup>, SU Tian<sup>1,2</sup>, HU Shu-zhen<sup>1,2</sup>,  
CHEN Yong-zhen<sup>1,2</sup>, YU She-bao<sup>1</sup>, SHI Jian-min<sup>1,2</sup>

(1. College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, Jiangxi, China; 2. Jiangxi Provincial Key Laboratory for Bamboo Germplasm Resources and Utilization, Nanchang 330045, Jiangxi, China)

**Abstract:** [Objective] To study the nutrient distribution and low P adaptive mechanism of *Phyllostachys glauca* McClure in the soil of limestone mountain which is highly heterogeneous and the nutrient distribution is uneven. [Method] The N and P contents in leaf, branch, culm, stump, rhizome and root of *Ph. glauca* were measured and analyzed at different soil habitats (continuous soil, semi-continuous soil, and sporadic soil) in the limestone mountain of northwest Jiangxi Province. [Result] (1) With the increase of rock coverage, the total N content of soil increased, but the total P content was low in all the three habitats. (2) The N content of *Ph. glauca* increased with the increase of rock coverage, and reached the highest value in sporadic soil habitat. Conversely, the P content decreased with the increase of rock coverage. The ratio of N:P content of plants increased sharply with the greatest degree of P deficiency in sporadic soil habitat, but the ratio of N:P content of leaf remained relatively stable. With the increase of rock coverage, the N content in each component of *Ph. glauca* showed a slowly increasing trend, while the P content showed a decreasing trend, and all plant components except leaf decreased significantly. (3) The distribution pattern of N and P changed with the increase of the rock coverage. No difference was observed on the proportion of N among the three habitats (except the rhizome). The P distribution of leaf in semi-continuous soil and sporadic soil was significantly higher than that in continuous soil, but in semi-continuous soil the P distribution proportion of culm was significantly lower than that in continuous soil. [Conclusion] The N and P content in *Ph. glauca* are positively correlated to soil N and P supply. In the case of sufficient supply of soil N and insufficient supply of soil P, this bamboo species will enrich the scarce nutrients (P) to leaf by adjusting its interior distribution pattern, and then ensure the photosynthetic needs of leaf to maintain plant growth and improve the adaptability under soil stress.

**Keywords:** *Phyllostachys glauca*; limestone mountains; heterogeneity; soil nutrients; distribution pattern.