

DOI:10.12171/j.1000-1522.20190185

## 干热河谷优势灌木养分重吸收率及其 C:N:P 化学计量特征

贺静雯<sup>1</sup> 刘颖<sup>1</sup> 余杭<sup>1</sup> 吴建召<sup>1</sup> 崔羽<sup>1</sup> 林勇明<sup>1</sup> 王道杰<sup>2</sup> 李键<sup>1</sup>

(1. 福建农林大学林学院, 福建省高校森林生态系统过程与经营重点实验室, 福建福州 350002;

2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川成都 640001)

**摘要:**【目的】探讨干热河谷区灌木植物成熟叶与衰老叶之间的养分重吸收率及其 C:N:P 化学计量特征。【方法】以坡柳、马桑和苦刺为研究对象, 运用单因素方差分析和 Pearson 相关性分析, 测定并计算其鲜叶、凋落叶的养分含量、重吸收率及其 C:N:P 化学计量比。【结果】除凋落叶 N 含量表现为马桑 > 苦刺 > 坡柳外, 鲜叶 N、P 及凋落叶 P 含量均表现为苦刺 > 坡柳 > 马桑。苦刺 N 重吸收率最高, 坡柳 P 重吸收率最高。3 种灌木鲜叶和凋落叶 C:N、C:P 均存在显著差异性 ( $P < 0.05$ ), N:P 无显著差异。此外坡柳 N 重吸收率与凋落叶 C:N、P 重吸收率与鲜叶 C:N 具有显著相关性 ( $P < 0.05$ ), 马桑 N 重吸收率与鲜叶 C:N、凋落叶 N:P 和 P 重吸收率与鲜叶 C:N、N:P 均呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ), 苦刺 N 重吸收率与凋落叶 C:N、N:P 具有显著相关性 ( $P < 0.05$ )。3 种灌木除鲜叶 N 含量与土壤中水解氮 (AN) 含量存在显著相关性外, 鲜叶和凋落叶 C、N、P 含量与土壤中各养分含量均无显著相关性。【结论】3 种灌木除在生长过程中受 P 限制外, N、P 含量均表现为不完全吸收, N、P 重吸收率均低于全球尺度上多种陆生植物的养分重吸收率, 说明干热河谷坡柳、马桑和苦刺成熟植株通过养分重吸收来适应贫瘠立地的能力弱化, N、P 养分保存和自身转移能力较低。

**关键词:** 干热河谷; 优势灌木; 鲜叶; 凋落叶; 重吸收率; 化学计量比

中图分类号: S718.43 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2020)01-0018-09

引文格式: 贺静雯, 刘颖, 余杭, 等. 干热河谷优势灌木养分重吸收率及其 C:N:P 化学计量特征 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(1): 18-26. He Jingwen, Liu Ying, Yu Hang, et al. Nutrient reabsorption efficiency of dominant shrubs in dry-hot valley and its C:N:P stoichiometry [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(1): 18-26.

### Nutrient reabsorption efficiency of dominant shrubs in dry-hot valley and its C:N:P stoichiometry

He Jingwen<sup>1</sup> Liu Ying<sup>1</sup> Yu Hang<sup>1</sup> Wu Jianzhao<sup>1</sup> Cui Yu<sup>1</sup>  
Lin Yongming<sup>1</sup> Wang Daojie<sup>2</sup> Li Jian<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Forest Ecosystem Process and Management of Fujian Province, College of Forestry,

Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 640001, Sichuan, China)

**Abstract:** [Objective] This paper aims to explore the leaf nutrient content before and after senescing, nutrient reabsorption efficiency (RE) and C:N:P stoichiometry of *Dodonaea viscosa*, *Coriaria sinica* and *Sophora davidii* in hot and dry valley. [Method] One way analysis of variance and Pearson correlation analysis were used. [Result] The results showed that the contents of nitrogen (N) in litter were as follows:

收稿日期: 2019-04-30 修回日期: 2019-06-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41790434), 福建农林大学杰出青年科研人才计划项目 (xjq2017016), 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室开放基金 (2019), 福建农林大学科技创新专项基金项目 (CXZX2017111、CXZX2017283)。

第一作者: 贺静雯。主要研究方向: 自然资源管理。Email: 1121833004@qq.com 地址: 350002 福建省福州市仓山区上下店路 15 号福建农林大学林学院。

责任作者: 林勇明, 博士, 教授。主要研究方向: 区域资源优化、生态学。Email: monkey1422@163.com 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

*C. sinica* > *S. davidii* > *D. viscosa*, the contents of nitrogen (N) and phosphorus (P) in fresh leaves, P in litter followed an order of *S. davidii* > *D. viscosa* > *C. sinica*. *S. davidii*'s N had the highest reabsorption efficiency. And the reabsorption efficiency of *D. viscosa*'s P was the highest. There were significant differences ( $P < 0.05$ ) between the three shrub fresh leaves and litter C:N, C:P, however, N:P had no significant difference. In addition, N reabsorption efficiency of *D. viscosa* was significantly correlated ( $P < 0.05$ ) with C:N of the litter, and P reabsorption efficiency was significantly correlated with C:N of the fresh leaf. At the same time, N reabsorption efficiency of *C. sinica* was significantly and negatively correlated with C:N of the fresh leaf, N:P of the litter, P reabsorption efficiency was significantly and negatively correlated with C:N, N:P of the fresh leaf, and N reabsorption efficiency of *S. davidii* was significantly correlated with C:N, N:P of the litter. Except for the significant correlation between the N content of fresh leaves and the AN content in soil, there was no significant correlation between the contents of C, N and P in the leaves and the contents of nutrients in the soil. [Conclusion] On the whole, the three shrubs are restricted by P during the growth process, and the N and P contents are all incompletely absorbed. In addition, the N and P reabsorption rates are lower than the nutrient reabsorption rates of various terrestrial plants on a global scale. It shows that the ability of the dry heat valley *D. viscosa*, *C. sinica* and *S. davidii* shrubs to adapt to the barren land through nutrient reabsorption is gradually weakened, and the N and P nutrient preservation ability is reduced.

**Key words:** dry hot valley; dominant shrub; fresh leaf; litter; reabsorption efficiency; stoichiometric ratio

养分重吸收作用是指植物叶片凋落前将养分转移至其他组织或直接利用的过程<sup>[1]</sup>,其作为植物重要的营养保存机制,不仅降低了植物器官凋落造成的营养损失,还起到持续供应植物生产所需养分的重要作用<sup>[2-3]</sup>。从而使养分在植物体与环境间的循环周期降低,对维持群落和生态系统的营养平衡及生产力具有重要的意义<sup>[4]</sup>。植物养分重吸收的变化一方面与植物养分需求有关,另一方面与环境中养分的供应有关<sup>[5]</sup>,其可反映植物对养分吸收利用策略和恶劣环境的响应机制,也是植物应对营养胁迫和维持生态位的主要手段<sup>[2,6]</sup>。其中,养分重吸收率(某特定元素在鲜叶和凋落叶中的浓度差占鲜叶中浓度的比例)为描述养分重吸收能力的重要指标,在研究中得到广泛应用<sup>[7]</sup>。如张林等<sup>[8]</sup>对青藏高原东南部灌木叶氮回收的研究中发现,部分常绿灌木通过降低凋落叶中的氮含量来增加养分的重吸收利用效率,从而适应恶劣的高寒胁迫环境。闫帮国等<sup>[9]</sup>对干热河谷植物养分含量的研究中发现,干热河谷草本植物对限制其生长的主要元素具有较高的再吸收能力,此为适应干热河谷贫瘠环境的重要生存策略。

作为植物体细胞结构与功能最为重要的养分元素,C、N、P在植物生理代谢过程中发挥着重要的作用<sup>[10]</sup>。C是植物体形态构架塑造的最基本元素<sup>[11]</sup>,N和P是植物的基本营养元素,也是生物体蛋白质和遗传物质的重要组成元素,对植物的生长发育有着重要影响<sup>[12]</sup>。植物叶片C:N和C:P可反映植物利用养分时的固碳能力和固碳效率的高低,也反映出

植物的竞争能力和对贫瘠环境的适应能力<sup>[13-14]</sup>,N:P可作为评价植物养分受限状况的主要依据<sup>[15]</sup>。以上元素的化学计量学特征是分析生态系统能量平衡和元素平衡的基本手段,对于阐明生态系统元素循环与制约变化规律、确定资源环境的开发利用策略具有重要的参考价值<sup>[16-17]</sup>。近年来,许多学者开展了脆弱生态系统生态化学计量特征的研究,如闫帮国等<sup>[18]</sup>、刘旻霞等<sup>[19]</sup>和罗玉珠等<sup>[20]</sup>分别对干热河谷区植物化学计量特征与生物量之间的关系,青藏高原高寒草甸不同功能群及植物群落生态化学计量特征进行了研究,但从生态化学计量学角度针对干热河谷灌木养分重吸收的研究涉及较少。因此,研究脆弱生态系统优势物种不同养分含量、养分重吸收效率及其C、N、P化学计量特征,了解其养分循环速率和养分利用效率,对促进脆弱生态系统的植被恢复和可持续发展有重要意义。

干热河谷是我国西南地区典型的生态脆弱区,该区具备干、热两个基本属性,生态环境十分脆弱,主要植被类型为稀树灌草丛组成的“河谷型”萨瓦纳植被<sup>[21]</sup>。马桑(*Coriaria sinica*)、坡柳(*Dodonaea viscosa*)和苦刺(*Sophora davidii*)是云南省昆明市东川区干热河谷主要优势灌木<sup>[22]</sup>,其根系发达,对于干旱环境的适应能力强,分布较广。迄今为止,在该区内植物养分重吸收的研究主要针对新银合欢(*Leucaena leucocephala*)、赤桉(*Eucalyptus camaldulensis*)等人工林,对于干热河谷区优势灌木的研究报道尚不多见,无法正确认识该区灌木植物的适应生存对策。

因此,本文以生长在干热河谷典型小流域蒋家沟的3种常见灌木坡柳、马桑和苦刺为研究对象,通过分析其养分重吸收率和叶片C:N:P化学计量特征,阐明常见灌木对干热河谷的适应性机制和养分保存机制,总结归纳坡柳、马桑和苦刺这3种灌木应对恶劣生存环境的生长策略,对干热河谷区的生态恢复和生态建设具有重要的指导意义。

## 1 研究区概况和研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于金沙江流域一级支流小江流域右岸的蒋家沟流域,行政隶属于云南省昆明市东川区绿茂村,位置介于103°06′~103°13′E、26°13′~26°17′N。流域内山高坡陡,最高海拔3269 m,最低海拔1042 m,其中海拔<1600 m的区域为干热河谷气候区<sup>[3]</sup>。该地气候温暖,年均温在20℃以上;焚风效应明显,蒸发量很大,年平均降雨量仅693 mm,年平均蒸发量3638 mm,蒸发量约为降雨量的5倍<sup>[23]</sup>。流域内岩层破碎、地形陡峭、植被稀疏,加上人为不合理利用,滑坡崩塌活动强烈,泥石流暴发频繁<sup>[24]</sup>,导致该区域石漠化严重,土壤类型主要为含砾石较高的初育土。

### 1.2 样地概况

于2018年8月在蒋家沟流域中下游阴坡或半

阴坡的区域对3种灌木植物叶片及其土壤进行采样。基于代表性和典型性原则,在海拔、坡向和坡度等地形因子大致相同的立地环境下,选择流域内分布的3种典型灌木群落类型(表1)。样地中分布的3种灌木均处于成熟期,成熟植株8~14年生。其中,坡柳灌木群落坡向为正北,坡面坡度约为43°,灌木密度约为1153株/hm<sup>2</sup>,分布面积约2500 m<sup>2</sup>。样地林木稀少,仅有少量新银合欢(*Leucaena leucocephala*)零星分布,其下草本植物主要有拟金茅(*Eulaliopsis binata*)、扭黄茅(*Heteropogon contortus*)、小叶荩草(*Arthraxon lancifolius*)、黄背草(*Themeda japonica*)等,林下植被盖度约50%。马桑灌木群落坡向为东北,坡面坡度约为40°,灌木密度约为1246株/hm<sup>2</sup>,分布面积约2800 m<sup>2</sup>,其下草本植物主要有扭黄茅、多花杭子梢(*Campylotropis polyantha*)、黄背草等,林下植被盖度约45%。苦刺灌木群落坡向为东北,坡面坡度约为38°,灌木密度约为1422株/hm<sup>2</sup>,分布面积约2200 m<sup>2</sup>,林下植被稀少,以小叶荩草、扭黄茅为主,并伴随少量自然萌生的剑麻(*Agave achilleoides*),林下植被盖度约35%。笔者分别在坡柳、马桑和苦刺灌木群落内,选取长势及冠幅较为接近的成熟灌木,设9个10 m×10 m的样方,用于凋落叶收集、鲜叶和土壤取样,3种灌木共27个10 m×10 m样方。

表1 3种灌木样地概况

Tab. 1 Characteristics of three types of shrub sample plots

物种 Species	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Elevation/m	坡度 Slope/(°)	坡向 Aspect	平均树高 Average tree height/m	平均冠幅 Average crown width/m
坡柳 <i>Dodonaea viscosa</i>	103°08'15"E	26°14'25"N	1483	43	N	1.38	1.16
马桑 <i>Coriaria sinica</i>	103°08'47"E	26°14'55"N	1548	40	NE	2.69	3.44
苦刺 <i>Sophora davidii</i>	103°08'26"E	26°14'27"N	1427	38	NE	1.17	0.79

### 1.3 样品采集

对鲜叶进行取样,在各样方中分别选取3株成熟灌木,依据植物生长状况,以离心式确定枝序。即植株主干为0级,同期从主干分出的分枝为1级,由1级枝同期分出的分枝定为2级,以此类推,采集植株中上部向阳一侧3级枝条上完整无病虫害且当年生的成熟叶片20片。将每个样方中采集的3株灌木鲜叶混合后装袋,作为1个样品。每种灌木9个样品,3种灌木共27袋鲜叶混合样品。将样品带回实验室,于烘箱中90℃杀青30 min后,65℃烘至恒质量,最后粉碎过0.5 mm筛备用。

对凋落叶进行取样,在各株采集过鲜叶的灌木下放置一块尼龙布,通过轻摇树干或树枝的方式收集凋落的叶片,并去除凋落物的杂质<sup>[25]</sup>。将各样地中3株灌木下收集的凋落叶混合,装进信封。

27个样地凋落叶收集完毕后,将样品带回实验室,于烘箱中65℃烘至恒质量,最后粉碎过0.5 mm筛备用。

对土壤进行取样,在每个10 m×10 m样地中,采用五点取样法以梅花型选取5个点,先去除表面腐殖质层,然后取0~10 cm处土壤,并将5个点的土样混合均匀,作为1个土壤样品。每种灌木共取得9份混合土壤样品,3种灌木共27份土壤样品。去除土样中的杂物后风干3~5 d,随后过2 mm土壤筛测定水解氮和有效磷,过0.149 mm筛测定土壤有机碳、全氮和全磷(表2)。

### 1.4 样品测定

植物有机碳采用重铬酸钾-外加热法(GB 7657—7)测定,植物样品经浓H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-HClO<sub>4</sub>消煮后,用半微量凯氏定氮法(LY/T 1269—1999)测定氮



表 2 3 种灌木样地 0~10 cm 土壤性质

Tab. 2 Soil properties of the 0~10 cm layer of three different shrub sample plots

物种 Species	有机碳含量 SOC content/(g·kg <sup>-1</sup> )	全氮含量 TN content/(g·kg <sup>-1</sup> )	全磷含量 TP content/(g·kg <sup>-1</sup> )	水解氮含量 AN content/(mg·kg <sup>-1</sup> )	有效磷含量 AP content/(mg·kg <sup>-1</sup> )
坡柳 <i>Dodonaea viscosa</i>	37.57 ± 10.03a	1.72 ± 0.58a	1.09 ± 0.05a	224.93 ± 24.68a	49.13 ± 1.49a
马桑 <i>Coriaria sinica</i>	21.14 ± 7.65a	2.5 ± 0.52a	1.04 ± 0.02a	113.87 ± 40.01a	27.51 ± 10.83a
苦刺 <i>Sophora davidii</i>	31.92 ± 4.06a	1.7 ± 0.29a	1.11 ± 0.13a	201 ± 42.58a	52.01 ± 1.47a

注: SOC. 土壤有机碳; TN. 全氮; TP. 全磷; AN. 水解氮; AP. 有效磷。同列不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。Notes: SOC, soil organic carbon; TN, total nitrogen; TP, total phosphorus; AN, alkali-hydrolyzable nitrogen; AP, available phosphorus. Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at  $P < 0.05$  level. The same below.

含量,用钼锑抗比色法(LY/T 1270—1999)测定磷含量。土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)采用重铬酸钾-外加加热法(LY/T 1237—1999)测定,土壤全氮(total nitrogen, TN)经浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-HClO<sub>4</sub> 消煮后,用半微量凯氏定氮法(LY/T 1228—1999)测定,用碱熔-钼锑抗比色法(LY/T 1232—1999)测定土壤全磷(total phosphorus, TP),用碱解-扩散法(LY/T 1229—1999)测定土壤水解性氮(alkali-hydrolyzable nitrogen, AN),用盐酸-硫酸浸提法(LY/T 1233—1999)测定土壤有效磷(available phosphorus, AP)。

### 1.5 数据处理及统计分析

养分重吸收率(resorption efficiency)计算公式为  $RE = (x_1 - x_2)/x_1 \times 100\%$ , 式中:  $x_1$  为鲜叶中某养分含量,  $x_2$  为凋落叶中该养分含量, RE 为养分重吸收率<sup>[26]</sup>。用 Excel 2016 和 R language 3.5.3 处理数据,运用单因素(One-way ANOVA)方差分析进行显著性检验,以  $P < 0.05$  表示。用 Pearson 相关分析对 3 种灌木鲜叶和凋落叶 N、P 重吸收率以及 C:N:P 化学计量特征进行相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 3 种灌木鲜叶和凋落叶 C、N、P 含量

由表 3 可知,坡柳、马桑、苦刺鲜叶和凋落叶 C 含量均存在显著差异性 ( $P < 0.05$ )。其中,坡柳鲜叶 C 含量最高,可高达 681.88 g/kg;苦刺鲜叶 C 含量最低,在 378.25 ~ 394.49 g/kg 之间,3 种灌木凋落叶 C 含量大小关系与鲜叶一致。苦刺鲜叶 N、P 含量分别在 70.45 ~ 74.35 g/kg 和 1.44 ~ 1.52 g/kg 之间,显著高于坡柳和马桑 ( $P < 0.05$ )。3 种灌木凋落叶 N、P 含量均存在显著差异性 ( $P < 0.05$ ),其中马桑凋落叶 N 含量最高,在 31.78 ~ 34.06 g/kg 之间,坡柳凋落叶 N 含量最低,在 14.06 ~ 16.46 g/kg 之间;苦刺凋落叶 P 含量最高,在 1.16 ~ 1.26 g/kg 之间,坡柳凋落叶 P 含量最低,在 0.5 ~ 0.52 g/kg 之间。3 种灌木鲜叶 C、N、P 含量均大于凋落叶,其中 C 含量变化趋势表现为苦刺 > 马桑 > 坡柳, N 含量变化趋势表现为苦刺 > 坡柳 > 马桑, P 含量变化趋势表现为坡柳 > 苦刺 > 马桑。

表 3 3 种灌木鲜叶和凋落物 C、N、P 含量

Tab. 3 C, N, P contents of fresh leaf and litter in three shrubs

类型 Type	物种 Species	C 含量 C content	N 含量 N content	P 含量 P content
鲜叶 Fresh leaf	坡柳 <i>Dodonaea viscosa</i>	681.88 ± 18.68a	34.99 ± 2.44a	0.99 ± 0.04a
	马桑 <i>Coriaria sinica</i>	462.65 ± 3.89b	34.93 ± 1.41a	0.94 ± 0.09a
	苦刺 <i>Sophora davidii</i>	386.37 ± 8.12c	72.40 ± 1.95b	1.48 ± 0.04b
凋落叶 Litter	坡柳 <i>Dodonaea viscosa</i>	652.89 ± 16.62a	15.26 ± 1.20a	0.51 ± 0.01a
	马桑 <i>Coriaria sinica</i>	428.48 ± 6.14b	32.92 ± 1.14b	0.74 ± 0.03b
	苦刺 <i>Sophora davidii</i>	276.61 ± 5.55c	28.11 ± 1.50c	1.21 ± 0.05c

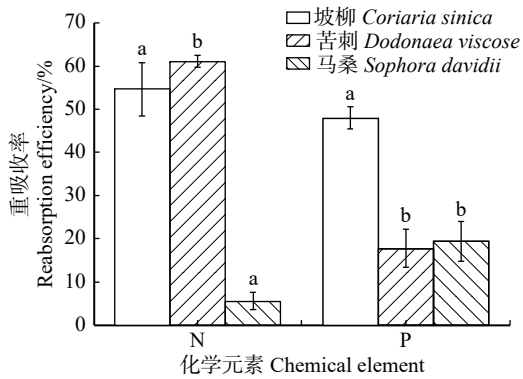
### 2.2 3 种灌木 N、P 重吸收率

由图 1 可知,3 种灌木中,坡柳和苦刺 N 重吸收率大于 P 重吸收率,马桑 N 重吸收率小于 P 重吸收率。苦刺 N 重吸收率最高,在 59.74% ~ 62.44% 之间;其次为坡柳,在 48.53% ~ 60.79% 之间;马桑 N 重吸收率最低,在 3.6% ~ 7.6% 之间,且苦刺 N 的重吸收率显著大于坡柳和马桑 ( $P < 0.05$ )。坡柳 P 的

重吸收率最高,在 45.38% ~ 50.5% 之间,其次为马桑,在 14.85% ~ 24.01% 之间,苦刺 P 的重吸收率最低,在 13.36% ~ 22.2% 之间,且坡柳 P 的重吸收率显著大于马桑和苦刺 ( $P < 0.05$ )。

### 2.3 3 种灌木鲜叶和凋落叶 C:N:P 化学计量比

由表 4 可知,3 种灌木鲜叶和凋落叶 C:N:P 化学计量比存在显著差异。3 种灌木鲜叶 C:N 与



不同小写字母表示不同灌木间差异显著 ( $P < 0.05$ )。Different lowercase letters indicate significant differences among different shrubs ( $P < 0.05$ ).

图1 3种灌木 N、P 重吸收率

Fig. 1 N, P reabsorption efficiency in three shrubs

C:P 均表现为坡柳 > 马桑 > 苦刺, 且三者之间 C:N、C:P 存在显著差异性 ( $P < 0.05$ ); 鲜叶 N:P 表现为苦刺 > 马桑 > 坡柳, 且苦刺鲜叶 N:P 显著高于坡柳和马桑 ( $P < 0.05$ )。凋落叶 C:N 与 C:P 与鲜叶一致, 均表现为坡柳 > 马桑 > 苦刺, 坡柳凋落叶 C:N 显著高于马桑和苦刺 ( $P < 0.05$ ), 3 种灌木凋落叶 C:P 存在显著差异性 ( $P < 0.05$ )。此外, 3 种灌木凋落叶 N:P 表现为马桑 > 坡柳 > 苦刺, 且三者之间存在显著差异性 ( $P < 0.05$ )。

## 2.4 坡柳、马桑和苦刺 N、P 重吸收率与鲜叶、凋落叶 C:N:P 化学计量特征的相关性分析

由表 5 可知, 坡柳 N 重吸收率与鲜叶 C:N、N:P、C:P 均无显著相关性, 与凋落叶 C:N 呈显著正相关, N:P 呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ); 坡柳 P 重吸收率除与鲜叶 C:N 呈显著正相关外 ( $P < 0.05$ ), 与其他均无显著相关性。马桑 N 重吸收率与鲜叶 C:N、凋落叶 N:P 呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ); 马桑 P 重吸收率与鲜叶 C:N、N:P 呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ), 与 C:P 呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ ), 与凋落叶 C:N、N:P、C:P 均无显著相关性。苦刺 N 重吸收率与凋落叶 C:N 呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )、N:P 呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ ), P 重吸收率与鲜叶、凋落叶 C:N、N:P、C:P 均无显著相关性。此外, 由表 6 可知, 除鲜叶中 N 含量与土壤中 AN 含量存在显著相关外, 3 种灌木鲜叶和凋落叶 C、N、P 含量与土壤中各养分含量均无显著相关性。

## 3 讨论

### 3.1 3 种灌木鲜叶和凋落叶 N、P 变化及其重吸收率特征

植物叶片是植物代谢活动最活跃的器官, 其营养元素含量能反映代谢类型、生长环境和生长过程

表 4 3 种灌木鲜叶和凋落叶 C:N:P 化学计量特征

Tab. 4 C, N, P stoichiometry of fresh leaf and litter in three shrubs

类型 Type	物种 Species	C:N	N:P	C:P
鲜叶 Fresh leaf	坡柳 <i>Dodonaea viscosa</i>	20.01 ± 1.57a	35.35 ± 1.69a	698.22 ± 40.38a
	马桑 <i>Coriaria sinica</i>	13.34 ± 0.46b	38.19 ± 2.21a	510.30 ± 35.54b
	苦刺 <i>Sophora davidii</i>	5.36 ± 0.19c	49.17 ± 1.94b	262.08 ± 7.41c
凋落叶 Litter	坡柳 <i>Dodonaea viscosa</i>	44.16 ± 3.76a	30.14 ± 2.59a	1 285.51 ± 43.54a
	马桑 <i>Coriaria sinica</i>	13.10 ± 0.54b	44.85 ± 1.82b	586.15 ± 27.24b
	苦刺 <i>Sophora davidii</i>	10.04 ± 0.76b	23.54 ± 1.74c	231.03 ± 11.20c

表 5 3 种灌木鲜叶和凋落叶 N、P 重吸收率与 C:N:P 化学计量特征的相关性

Tab. 5 Correlations between N, P reabsorption efficiency (RE) of fresh leaf and litter and C:N:P stoichiometric characteristics in three shrubs

物种 Species	重吸收率 RE	鲜叶 Fresh leaf			凋落叶 Litter		
		C:N	N:P	C:P	C:N	N:P	C:P
坡柳 <i>Dodonaea viscosa</i>	N	-0.287	0.657	-0.193	0.718*	-0.741*	0.050
	P	0.429*	0.123	0.347	-0.100	0.052	0.260
马桑 <i>Coriaria sinica</i>	N	-0.797*	0.099	-0.502	0.141	-0.719*	-0.660
	P	-0.697*	-0.714*	-0.969**	-0.09	-0.35	-0.430
苦刺 <i>Sophora davidii</i>	N	-0.029	-0.090	-0.072	0.859**	-0.851**	0.307
	P	0.486	-0.350	0.161	-0.34	0.457	-0.06

注: \*表示显著相关 ( $P < 0.05$ ); \*\*表示极显著相关 ( $P < 0.01$ )。下同。Notes: \* indicates significant difference ( $P < 0.05$ ); \*\* indicates extremely significant difference ( $P < 0.01$ ). The same below.

表 6 3 种灌木土壤养分含量与叶片养分含量的相关性分析

Tab. 6 Correlations between soil nutrient content and leaf nutrient content in three shrubs

	养分含量 Nutrient content	有机碳 SOC	全氮 TN	全磷 TP	水解氮 AN	有效磷 AP
鲜叶 Fresh leaf	SOC	0.232	-0.088	-0.213	-0.098	0.145
	TN	0.092	-0.33	-0.029	0.579*	0.434
	TP	-0.023	-0.295	-0.136	0.388	0.305
凋落叶 Litter	SOC	0.159	-0.067	-0.14	-0.237	-0.044
	TN	-0.485	0.331	0.097	-0.066	-0.511
	TP	-0.045	-0.146	0.045	0.45	0.213

中的营养问题<sup>[27]</sup>。前人研究发现,植物种类,植物所在地的气候、土壤养分等可能会对植物叶片 N、P 含量产生影响<sup>[28]</sup>。本研究中,除 3 种灌木鲜叶中 N 含量与土壤中 AN 含量存在显著相关外,灌木鲜叶、凋落叶 C、N、P 含量与土壤中各养分含量均无显著相关性。此外,由于不同灌木的土壤养分间无显著差异,且所在的样地气候、海拔、坡度大体上一致,因此研究区的土壤全量养分并非限制不同灌木养分含量间存在差异的主要原因,速效养分尤其是 AN 的可利用程度为鲜叶 N 含量的主控因子<sup>[29]</sup>。苦刺鲜叶 N、P 含量均显著高于坡柳和马桑,说明苦刺对 N、P 的吸收能力要高于其他灌木,这是因为苦刺为豆科(Leguminosae)植物,本身固氮能力较强,造成叶片氮含量较高,朱军涛等<sup>[30]</sup>的研究也发现豆科植物比非豆科植物有更高的叶氮含量。坡柳、马桑和苦刺鲜叶中 N 含量的平均值分别为 34.99、34.93 和 72.4 g/kg,显著高于其他陆生植物叶中 N 含量的平均值(20.6 g/kg)。而 P 含量的平均值分别为 0.99、0.94 和 1.48 g/kg,显著低于其他植物叶 P 含量的平均值(2.0 g/kg)<sup>[31]</sup>。前人研究发现,因元素缺乏限制,植物叶片元素含量趋于与土壤元素含量保持正相关的反馈机制<sup>[32]</sup>。3 种灌木叶片 P 含量与土壤中全 P 含量相似,说明植物体 P 吸收受土壤 P 含量的限制。李志安等<sup>[33]</sup>研究发现,当植物凋落叶中 N 质量分数 < 0.7% 且 P 质量分数 < 0.04% 时,植物对 N 和 P 的养分重吸收率最大化。本研究中,3 种灌木凋落叶中 N 含量为 1.53% ~ 3.29%, P 含量为 0.05% ~ 0.12%,说明马桑、坡柳和苦刺中 N、P 含量均为不完全吸收,表明干热河谷优势灌木养分重吸收能力较差。

影响植物叶片养分重吸收率的因素很多,不同物种的重吸收能力存在差异,同一物种在不同生境下的重吸收特性也不同<sup>[34]</sup>。本实验中,3 种灌木 N 重吸收率表现为苦刺 > 坡柳 > 马桑,且苦刺 N 重吸收率显著高于坡柳和马桑。这是因为豆科植物苦刺具有生物固氮能力,其整体的 N 循环较非固氮植物有很大的差异<sup>[7]</sup>,从而导致其植物体内 N 重吸收

率与其他两种灌木具有显著差异性。P 重吸收率表现为坡柳 > 马桑 > 苦刺,且坡柳 P 重吸收率显著高于马桑和苦刺。Aerts 等<sup>[35]</sup>研究发现衰老叶片中养分含量越低,养分重吸收率越高。本研究中,坡柳凋落叶的 P 含量最低,为 0.51 g/kg,植物能通过降低衰老叶中养分含量来提高养分重吸收率,因此坡柳 P 重吸收率显著高于马桑和苦刺。Leonardus 等<sup>[31]</sup>人在全球尺度上对多种陆生植物的养分重吸收率研究表明,N、P 具有较高的养分重吸收率(分别为 62.1%、64.9%)。但在本研究中,蒋家沟流域 3 种灌木 N、P 重吸收率均低于上述研究结果,这一方面可能是物种不同导致,草本、灌木和乔木养分重吸收率存在较大的种间差异;另一方面也可能由于研究区域生境不同,植物养分重吸收率表现出特异性。刘宏伟等<sup>[36]</sup>对木本植物的养分重吸收率研究也得出相似的结论。

### 3.2 3 种灌木鲜叶和凋落叶 C : N : P 化学计量特征

前人研究发现,植物叶片的 C:N、C:P 可以反映植物的生长速度,且鲜叶中 C:N、C:P 越高,植物对 N、P 利用效率越高<sup>[37-38]</sup>。本研究中,3 种灌木鲜叶 C:N 与 C:P 均表现为坡柳 > 马桑 > 苦刺,且三者之间存在显著差异性( $P < 0.05$ ),说明坡柳对 N、P 利用效率最高,这在 3 种灌木 N、P 重吸收率中大致可以证实。N、P 是植物叶片的必要养分和植物生长的限制元素,鲜叶 N:P 常被用于判断植物养分受限状况<sup>[39]</sup>,当鲜叶 N:P 大于 16 时,P 是植物生长的主要限制因子<sup>[3,14]</sup>。3 种灌木的 N:P 在 35.35 ~ 49.17 之间,表明坡柳、马桑和苦刺生长均受 P 限制,这与刘万德等<sup>[32]</sup>、李志安等<sup>[33]</sup>3 种灌木 P 吸收受土壤 P 含量的限制的结论一致。前人研究发现,凋落叶中的 C:N、N:P 大小往往与分解速率呈负相关<sup>[14,40]</sup>。本研究发现,苦刺凋落叶 C:N、N:P 均低于坡柳和马桑,说明在其他环境条件相似的情况下 3 种灌木中苦刺凋落叶总体分解速率最快。此外,植物鲜叶 C:N 和 C:P 越高,反映植物的竞争能力及对贫瘠环境的适应能力就越强<sup>[41]</sup>。本研究中苦刺鲜叶中 N 含量远高

于其他两种灌木, P 重吸收率最低, 成熟的苦刺植株生长过程中通过其自身的固氮能力, 提高 N 含量, 降低叶片中的 C:N、N:P, 从而加快分解速率, 减少 P 的重吸收率, 以促进 P 在土壤中的循环效率, 使其从土壤中获得更多的养分, 这与邓浩俊<sup>[3]</sup>等的研究一致。

### 3.3 3种灌木重吸收率与鲜叶和凋落叶 C:N:P 化学计量特征的关系

养分重吸收率和 C:N:P 化学计量特征的相关性可以反映植物对养分的吸收和利用效率<sup>[42]</sup>。本实验中, 坡柳、苦刺 N 重吸收率与凋落叶 C:N 呈显著正相关, 与 N:P 呈显著负相关, 这与前面坡柳、苦刺对 N、P 利用效率较高的结果一致。马桑 N 重吸收率与鲜叶 C:N 呈显著负相关( $P < 0.05$ ), P 重吸收率与鲜叶 C:N、N:P、C:P 呈显著负相关, 说明 P 重吸收率对马桑叶片生态化学计量学性状的影响大于 N 重吸收率, 这与赵琼等<sup>[39]</sup>、Vitousek 等<sup>[40]</sup>马桑生长受 P 限制的结论一致。除马桑鲜叶与 P 重吸收率存在显著相关性外, 其余灌木鲜叶、凋落叶均与 N 重吸收率存在显著相关性, 一定程度上说明 N 吸收与再利用效率是影响植物体养分循环与平衡的关键因子。

## 4 结 论

坡柳、马桑和苦刺是蒋家沟流域的常见灌木, 它们对干热河谷生境的适应机理可为筛选区域内的适生植物提供理论基础。本研究对 3 种灌木植物养分重吸收和 C:N:P 化学计量进行研究, 发现豆科植物苦刺的鲜叶 N、P 含量均显著高于坡柳和马桑, 说明苦刺对 N、P 的吸收能力较高。3 种灌木鲜叶 N:P 均大于 16, 表明坡柳、马桑和苦刺生长均受 P 限制。N、P 含量在 3 种灌木中均表现为不完全吸收, N、P 重吸收率均低于全球尺度上对多种陆生植物的养分重吸收率, 表明干热河谷坡柳、马桑和苦刺成熟植株通过养分重吸收来适应贫瘠立地的能力弱化, N、P 养分保存和自身转移能力较低。此外, 3 种灌木鲜叶, 凋落叶 C:N、C:P、N:P 与 N、P 重吸收率有一定的显著关系, 说明凋落叶和鲜叶 C:N:P 之间的差异一定程度上影响了鲜叶衰落期间养分的再吸收效率。

### 参 考 文 献

[1] 严思维, 陈爱民, 林勇明, 等. 干热河谷区不同林龄赤桉叶中养分含量和再吸收率的比较及其线性回归分析[J]. 植物资源与环境学报, 2017, 26(1): 39-46.  
Yan S W, Chen A M, Lin Y M, et al. Comparisons on content and reabsorption rate of nutrients in leaf of *Eucalyptus camaldulensis* at different stand ages in arid-hot valley and their linear-regression analysis[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2017, 26(1): 39-46.

[2] Santa R I, Leonardi S, Rapp M. Foliar nutrient dynamics and nutrient use efficiency in *Castanea sativa* coppice stands of southern Europe[J]. *Forestry*, 2001, 74: 1-10.  
[3] 邓浩俊, 陈爱民, 严思维, 等. 不同林龄新银合欢重吸收率及其 C:N:P 化学计量特征[J]. 应用与环境生物学报, 2015, 21(3): 522-527.  
Deng H J, Chen A M, Yan S W, et al. Nutrient resorption efficiency and C:N:P stoichiometry in different ages of *Leucaena leucocephala*[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2015, 21(3): 522-527.  
[4] 汤璐瑛. 木本植物叶片养分重吸收研究[D]. 北京: 北京大学, 2012.  
Tang L Y. Study on nutrient reabsorption of woody plant leaves[D]. Beijing: Peking University, 2012.  
[5] Pugnaire F I, Chapin III F S. Controls over nutrient resorption from leaves of evergreen Mediterranean species[J]. *Ecology*, 1993, 74(1): 124-129.  
[6] Aerts R. Nutrient use efficiency in evergreen and deciduous species from heathlands[J]. *Oecologia*, 1990, 84: 391-397.  
[7] 段兵红, 陆姣云, 刘敏国, 等. 陇东雨养农区紫花苜蓿叶片氮、磷、钾重吸收与生物固氮的偶联关系[J]. 草业学报, 2016, 25(12): 76-83.  
Duan B H, Lu J Y, Liu M G, et al. Relationships between biological nitrogen fixation and leaf resorption of nitrogen, phosphorus, and potassium in the rain-fed region of eastern Gansu[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(12): 76-83.  
[8] 张林, 阎恩荣, 魏海霞, 等. 藏东南色季拉山林线过渡带 7 种灌木植物的叶氮回收潜力[J]. 植物生态学报, 2014, 38(12): 1325-1332.  
Zhang L, Yan E R, Wei H X, et al. Leaf nitrogen resorption proficiency of seven shrubs across timberline ecotones in the Sergymia Mountains, Southeast Xizang[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(12): 1325-1332.  
[9] 闫帮国, 何光熊, 史亮涛, 等. 元谋干热河谷燥红土和变性土上植物叶片的元素含量及其重吸收效率[J]. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1039-1045.  
Yan B G, He G X, Shi L T, et al. Element concentration in leaves and nutrient resorption efficiency on dry-red soil and vertisols in dry and hot valley in Yuanmou[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(4): 1039-1045.  
[10] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. *Ecology Letters*, 2010, 3(6): 540-550.  
[11] 戚德辉, 温仲明, 王红霞, 等. 黄土丘陵区不同功能群植物碳氮磷生态化学计量特征及其对微地形的响应[J]. 生态学报, 2016, 36(20): 6420-6430.  
Qi D H, Wen Z M, Wang H X, et al. Stoichiometry traits of carbon, nitrogen, and phosphorus in plants of different functional groups and their responses to micro-topographical variations in the hilly and gully region of the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(20): 6420-6430.  
[12] 平川, 王传宽, 全先奎. 环境变化对兴安落叶松氮磷化学计量特



- 征的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(8): 1965-1974.
- Ping C, Wang C K, Quan X K. Influence of environmental changes on stoichiometric traits of nitrogen and phosphorus for *Larix gmelinii* trees[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(8): 1965-1974.
- [13] 李从娟, 雷加强, 徐新文, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地人工植被及土壤CNP的化学计量特征[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5760-5767.
- Li C J, Lei J Q, Xu X W, et al. The stoichiometric characteristics of C, N, P for artificial plants and soil in the hinterland of Taklimakan Desert[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(18): 5760-5767.
- [14] 赵耀, 王百田, 李萌, 等. 晋西吕梁山区3种森林碳氮磷生态化学计量特征[J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24(3): 518-524.
- Zhao Y, Wang B T, Li M, et al. Ecological stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen, and phosphorus in three forests in the Lüliang Mountainous Area of Shanxi Province[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2018, 24(3): 518-524.
- [15] 余淑凤, 胡玉福, 舒向阳, 等. 川西北高寒沙地不同年限高山柳林下优势植物碳、氮、磷生态化学计量特征[J]. 草业学报, 2018, 27(4): 123-130.
- She S F, Hu Y F, Shu X Y, et al. Variation of C, N and P stoichiometry in dominant understory plants during stand development in *Salix cupularis* plantations in alpine grassland in Northwestern Sichuan[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(4): 123-130.
- [16] 王宝荣, 曾全超, 安韶山, 等. 黄土高原子午岭林区两种天然次生林植物叶片-凋落叶-土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2017, 37(16): 5461-5473.
- Wang B R, Zeng Q C, An S S, et al. C:N:P stoichiometry characteristics of plants-litter-soils in two kind types of natural secondary forest on the Ziwuling Region of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(16): 5461-5473.
- [17] Yu Q, Chen Q, Elser J J, et al. Linking stoichiometric homeostasis with ecosystem structure, functioning and stability[J]. Ecology Letters, 2010, 13(11): 1390.
- [18] 闫帮国, 刘刚才, 樊博, 等. 干热河谷植物化学计量特征与生物量之间的关系[J]. 植物生态学报, 2015, 39(8): 807-815.
- Yan B G, Liu G C, Fan B, et al. Relationships between plant stoichiometry and biomass in an arid-hot valley, Southwest China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015, 39(8): 807-815.
- [19] 刘昞霞, 朱柯嘉. 青藏高原东缘高寒草甸不同功能群植物氮磷化学计量特征研究[J]. 中国草地学报, 2013, 35(2): 52-58.
- Liu M X, Zhu K J. Characteristics of nitrogen and phosphorus stoichiometry of plants in different functional groups on alpine meadow in the eastern edge of Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Grassland, 2013, 35(2): 52-58.
- [20] 罗玉珠, 曾太, 东伟, 等. 高寒嵩草草甸植物群落生态化学计量特征研究[J]. 中国草地学报, 2013, 35(3): 92-96.
- Luo Y Z, Zeng T, Dong W, et al. Research of ecological stoichiometry of plant community in alpine kobresia meadow[J]. Chinese Journal of Grassland, 2013, 35(3): 92-96.
- [21] 金振洲, 欧晓昆, 周跃. 云南元谋干热河谷植被概况[J]. 植物生态学报, 1987, 11(4): 308-317.
- Jin Z Z, Ou X K, Zhou Y. The general situation of natural vegetation in dry-hot river valley of Yuanmou, Yunnan Province[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 1987, 11(4): 308-317.
- [22] 吴建召, 陈爱民, 崔羽, 等. 干热河谷常见植物地表形态特征与泥沙拦截的关系[J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24(6): 1236-1246.
- Wu J Z, Chen A M, Cui Y, et al. Relationship between near-surface morphological traits of familiar plants and their ability for sediment retention in a dry-hot valley[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2018, 24(6): 1236-1246.
- [23] 林勇明, 崔鹏, 王道杰, 等. 泥石流频发区人工新银合欢林群落特征[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(6): 63-67.
- Lin Y M, Cui P, Wang D J, et al. Community characteristic of plantation of *Leucaena leucocephala* in the area with high-frequency debris flow[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(6): 63-67.
- [24] 崔鹏, 王道杰, 韦方强. 干热河谷生态修复模式及其效应: 以中国科学院东川泥石流观测研究站为例[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(3): 60-64.
- Cui P, Wang D J, Wei F Q. Model and effect of ecological restoration of dry-hot valley: a case study of the CAS Dongchuan Debris Flow Observation Station[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2005, 3(3): 60-64.
- [25] Drenovsky R E, Koehler C E, Skelly K, et al. Potential and realized nutrient resorption in serpentine and non-serpentine chaparral shrubs and trees[J]. Oecologia, 2013, 171(1): 39-50.
- [26] 郭超, 蔡家艳, 金奇, 等. 鄱阳湖湿地优势植物氮磷再吸收[J]. 生态学杂志, 2016, 35(3): 692-697.
- Guo C, Cai J Y, Jin Q, et al. Nitrogen and phosphorus resorption of six dominant plant species in Poyang Lake wetlands[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(3): 692-697.
- [27] 罗绪强, 张桂玲, 杜雪莲, 等. 茂兰喀斯特森林常见钙生植物叶片元素含量及其化学计量学特征[J]. 生态环境学报, 2014, 23(7): 1121-1129.
- Luo X Q, Zhang G L, Du X L, et al. Characteristics of element contents and ecological stoichiometry in leaves of common calcicole species in Maolan Karst Forest[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(7): 1121-1129.
- [28] Elser J J, Fagan W F, Denno R F, et al. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs[J]. Nature, 2000, 408: 578-580.
- [29] Bowman W D, Bahn L, Damm M. Alpine landscape variation in foliar nitrogen and phosphorus concentrations and the relation to soil nitrogen and phosphorus availability[J]. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 2003, 35(2): 144-149.
- [30] 朱军涛, 李向义, 张希明, 等. 塔克拉玛干沙漠南缘豆科与非豆科植物的氮分配[J]. 植物生态学报, 2010, 34(9): 1025-1032.



- Zhu J T, Li X Y, Zhang X M, et al. Nitrogen allocation and partitioning within a leguminous and two non-leguminous plant species growing at the southern fringe of China's Taklamakan Desert[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(9): 1025–1032.
- [31] Leonardus V, Stefano M, Amilcare P, et al. Global resorption efficiencies and concentrations of carbon and nutrients in leaves of terrestrial plants[J]. *Ecological Monographs*, 2012, 82: 205–220.
- [32] 刘万德, 苏建荣, 李帅锋, 等. 云南普洱季风常绿阔叶林优势物种不同生长阶段叶片碳、氮、磷化学计量特征[J]. *植物生态学报*, 2015, 39(1): 52–62.
- Liu W D, Su J R, Li S F, et al. Leaf carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry at different growth stages in dominant tree species of a monsoon broad-leaved evergreen forest in Pu'er, Yunnan Province[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(1): 52–62.
- [33] 李志安, 林永标, 彭少麟. 华南人工林凋落叶养分及其转移[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(3): 321–326.
- Li Z A, Lin Y B, Peng S L. Nutrient content in litterfall and its translocation in plantation forests in south China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(3): 321–326.
- [34] 王冬梅, 杨惠敏. 4种牧草不同生长期 C、N 生态化学计量特征[J]. *草业科学*, 2011, 28(6): 921–925.
- Wang D M, Yang H M. Carbon and nitrogen stoichiometry at different growth stages in legumes and grasses[J]. *Pratacultural Science*, 2011, 28(6): 921–925.
- [35] Aerts R. Nutrient resorption from senescing leaves of perennials: are there general patterns?[J]. *The Journal of Ecology*, 1996, 84(4): 597–608.
- [36] 刘宏伟, 刘文丹, 王微, 等. 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[J]. *生态学报*, 2015, 35(12): 4071–4080.
- Liu H W, Liu W D, Wang W, et al. Leaf traits and nutrient resorption of major woody species in the karst limestone area of Chongqing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(12): 4071–4080.
- [37] 阎恩荣, 王希华, 郭明, 等. 浙江天童常绿阔叶林、常绿针叶林与落叶阔叶林的 C:N:P 化学计量特征[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 48–57.
- Yan E R, Wang X H, Guo M, et al. C:N:P stoichiometry across evergreen broad-leaved forests, evergreen coniferous forests and deciduous broad-leaved forests in the Tiantong region, Zhejiang Province, eastern China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(1): 48–57.
- [38] Gusewell S. N: P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance[J]. *New Phytol*, 2004, 164(2): 243–266.
- [39] 赵琼, 曾德慧. 林木生长氮磷限制的诊断方法研究进展[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(1): 122–128.
- Zhao Q, Zeng D H. Diagnosis methods of N and P limitation to tree growth: a review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(1): 122–128.
- [40] Vitousek P M, Turner D R, Parton W J, et al. Litter decomposition on the Mauna Loa environmental matrix, Hawaii: patterns, mechanisms, and models[J]. *Ecology*, 1994, 75: 418–429.
- [41] Aerts R, Chapin F S. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns[J]. *Advances in Ecological Research*, 1999, 30: 1–67.
- [42] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(30): 11001–11006.

(责任编辑 赵 勃  
责任编辑委 臧润国)