

引用格式: 过怡婷, 张思盈, 刘颖, 沈婉玲, 林勇明. 蒋家沟干热河谷区灌草层植被与土壤的养分分布及生态化学计量特征[J]. 山地学报, 2023, 41(6): 824-835.

GUO Yiting, ZHANG Siying, LIU Ying, SHEN Wanling, LIN Yongming. Nutrient distribution and ecological stoichiometry characteristics of shrub-grass layer vegetation and soil in the Jiangjia Gully, China [J]. Mountain Research, 2023, 41(6): 824-835.

蒋家沟干热河谷区灌草层植被与土壤的养分分布及生态化学计量特征

过怡婷^{a, b}, 张思盈^a, 刘颖^{a, b}, 沈婉玲^a, 林勇明^{a, b*}

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

摘要: 蒋家沟干热河谷区泥石流与滑坡灾害频发、植被枯败稀疏、土壤结构紊乱、生态环境脆弱, 是金沙江上游生态严重退化的典型流域。植被和土壤在退化生态系统修复和治理中扮演着至关重要的角色。对该流域植被与土壤的研究, 多侧重从单一物种或土壤酶活性等角度分析植被与土壤的养分耦合关系, 缺少对灌草层植物体养分含量与土壤养分含量的耦合机制研究, 即植被-土壤耦合机制机理尚不明确。本文选取蒋家沟干热河谷区典型灌草层植被, 研究碳(C)、氮(N)、磷(P)、钾(K)元素在植被地上、根系和土壤的养分分布和生态化学计量特征及其相关性。结果显示: (1) 与全国陆地植物平均水平相比, 干热河谷区灌草层植被地上和根系表现出低C、高N、P、K的特点; 土壤表现出低C高P的特点。(2) 植被地上部分的C、N、P、K含量均显著高于根系, C、N、P含量均显著高于土壤; 土壤K含量(56.05 g/kg)显著高于植被地上(18.43 g/kg)和根系(8.41 g/kg); 除P: K外(地上0.10 > 根系0.09 > 土壤0.01), 其余5种化学计量比均表现为根系 > 地上 > 土壤。(3) 灌草层植被地上、根系N、P、K含量及生态化学计量特征间均呈正相关, 土壤与植被的C、N、P、K含量和化学计量比多数不存在相关性。(4) 植被地上部分C: N(21.07)、C: P(247.05)、N: P(12.32)均低于根系(分别为32.95、512.10和15.71), 符合“生长速率假说”。根据N: P、N: K、P: K判断, 灌草层植被生长不受P、K限制而更易受到N的限制。根据C: N、C: P、N: P判断, 与全国表层土壤平均值相比, 土壤贫瘠缺乏C、N元素, P有效性较低。(5) 植被地上和根系在养分的分配过程中具有协同性。干热河谷区气候条件下植物应对策略为选择提高生长速率、降低养分利用效率。蒋家沟流域生态恢复应增加土壤有机碳和氮素的含量来改善土壤环境, 降低N元素对植物的限制。本研究可为改善蒋家沟流域生态环境提供参考。

关键词: 土壤养分; 化学计量比; 相关性分析; 干热河谷区; 云南蒋家沟

中图分类号: Q948.113

文献标志码: A

中国云南东川蒋家沟流域位于金沙江上游, 是典型的干热河谷生态脆弱区^[1]。受山谷风局地环流效应和焚风效应的影响, 谷坡下干上湿, 水热矛盾突出。过度放牧与林地采伐, 导致地质灾害频发、水

土流失严重、土壤结构紊乱、植被枯败稀疏, 区域生态系统严重退化。

植被和土壤作为陆地生态系统的重要组成部分^[2-3], 在退化生态系统修复和治理中扮演着至关

收稿日期(Received date): 2023-06-09; 改回日期(Accepted date): 2023-12-01

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(42071132); 福建省自然科学基金(2021J01060)。[National Natural Science Foundation of China (42071132); Natural Science Foundation of Fujian Province(2021J01060)]

作者简介(Biography): 过怡婷(2000-), 女, 江苏无锡人, 硕士研究生, 主要研究方向: 自然资源管理。[GUO Yiting(2000-), female, born in Wuxi, Jiangsu province, M. Sc. candidate, research on natural resources management] E-mail: 2768863857@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author): 林勇明(1982-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 恢复生态学。[LIN Yongming(1982-), male, Ph. D., professor, research on restoration ecology] E-mail: monkey1422@163.com

重要的角色。土壤和根系的相互作用对矿质养分的循环有重要影响^[4],植物地上-根系-土壤三者间还存在植物养分需求与土壤养分供应的动态平衡关系、显著的时空差异和相互作用^[5]。

研究表明^[6],在干热河谷区不同植被恢复模式下,土壤酶活性和土壤肥力之间存在密切关系。同一植被在不同生境和不同植被类型中,土壤酶活性具有显著差异,与土壤理化性质显著相关。针对葛藤覆被的研究发现^[7],不同的覆被类型和生物量共同影响土壤性质,鲜枯覆被类型均增加了土壤毛管孔隙度,而枯藤覆被则增加了土壤养分含量。针对银合欢、车桑子、扭黄茅等干热河谷典型植被研究发现,植物性状、土壤理化性质等环境因子是控制干热河谷地区土壤水分的主要因素,不同植被类型下土壤水分波动程度不同^[8]。然而,上述研究对植物与土壤养分的相互影响、地区生态环境与植被化学计量学特征的响应机理并没有清晰的认识,尚未揭示植被与土壤的耦合机制,无法解释其对植被化学计量学变化的驱动机制,难以总结出针对性的生态恢复措施。

蒋家沟河谷陡坡植被和土壤性状与其他气候区存在明显差异。国内学者对蒋家沟流域干热河谷区的植被组成、物种多样性以及土壤理化性质和侵蚀过程等方面进行了研究^[9-10],但更多关注植被与土壤酶活性的关系,以及单一植物与土壤理化性质耦合关系的研究,并没有将植物-土壤作为整体,探讨蒋家沟灌草层植被与土壤的养分分布和化学计量特征,分析植物生长发育的动态变化、养分限制情况以及对环境的适应性。

本研究选取蒋家沟典型灌草层植被,通过采集植被、根系和土壤样品,测定其碳(C)、氮(N)、磷(P)、钾(K)元素含量,对比4种元素在不同部位的养分分布和生态化学计量特征,运用相关性分析探究元素间的循环与平衡机制,从生态化学计量学视角阐明干热河谷区灌草层植被的养分限制状况、调节机理和应对策略,为该区的植被恢复与生境改善奠定基础。本研究有助于认识干热河谷区植被演变与土壤性质变化间的耦合关系和养分循环的调控机制,明确灌草层植被在干热河谷区恶劣环境条件下的适应生存策略,可为干热河谷区的生态恢复与治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

蒋家沟流域位于云南省昆明市东川区境内,处于云贵高原北部、乌蒙山脉西缘^[11]。蒋家沟是金沙江下游一级支流小江的右侧支沟,流域面积共48.5 km²,属于高山峡谷地貌,地形陡峭,植被稀少^[12],相对高差较大,流域内植被表现出明显的垂直地带性^[12]。本研究区位于海拔低于1600 m的亚热带干热河谷区,该区域气候干热少雨,年平均气温20 ℃,年平均降雨量600~700 mm,年平均蒸发量3700 mm,土壤为山地燥红土,是蒋家沟泥石流的主要堆积区^[13]。新构造运动活跃导致该地区沟岸出现严重的滑坡和崩塌,岩层破碎导致大量松散固体物质堆积,加之人类活动影响使区域泥石流多发,严重破坏了当地的生态环境^[14]。

对蒋家沟干热河谷区进行实地调查,该区域位于103°06'32"E~103°09'49"E,26°14'23"N~26°16'43"N,最低海拔1042 m,平均坡度29°。灌草层植被的平均覆盖度为60%,其中草本优势物种主要有羽芒菊(*Tridax procumbens*)、鬼针草(*Bidens pilosa*)、牛膝菊(*Galinsoga parviflora*)、披碱草(*Elymus dahuricus*)、荩草(*Arthraxon hispidus*)、龙爪茅(*Dactyloctenium aegyptium*)、牛筋草(*Eleusine indica*)、拟金茅(*Eulaliopsis binata*)、扭黄茅(*Heteropogon contortus*)等。灌木优势物种主要有马桑(*Coriaria sinica*)、坡柳(*Dodonaea viscosa*)、苦刺(*Sophora davidii*)、铁扫帚(*Indigofera bungeana Steud*)、长柄山蚂蝗(*Hylodesmum podocarpum*)、多花茺子梢(*Campylotropis polyantha*)等。

1.2 样地设置

本研究于2020年7—8月在中国科学院东川泥石流观测研究站开展前期调查研究和预实验。蒋家沟流域干热河谷区以灌草丛为主,乔木分布稀疏且多为人工种植的单纯林。因此,选择干热河谷区典型植被类型——灌草层植被作为研究对象,采用样带法进行采样。结合蒋家沟流域地形图(图1),剔除受人为干扰和灾害破坏的区域,在剩余区域共设置了14条长40 m宽10 m的样带,样带之间间隔100 m。在每个样带内,根据实际地形地貌和植被类

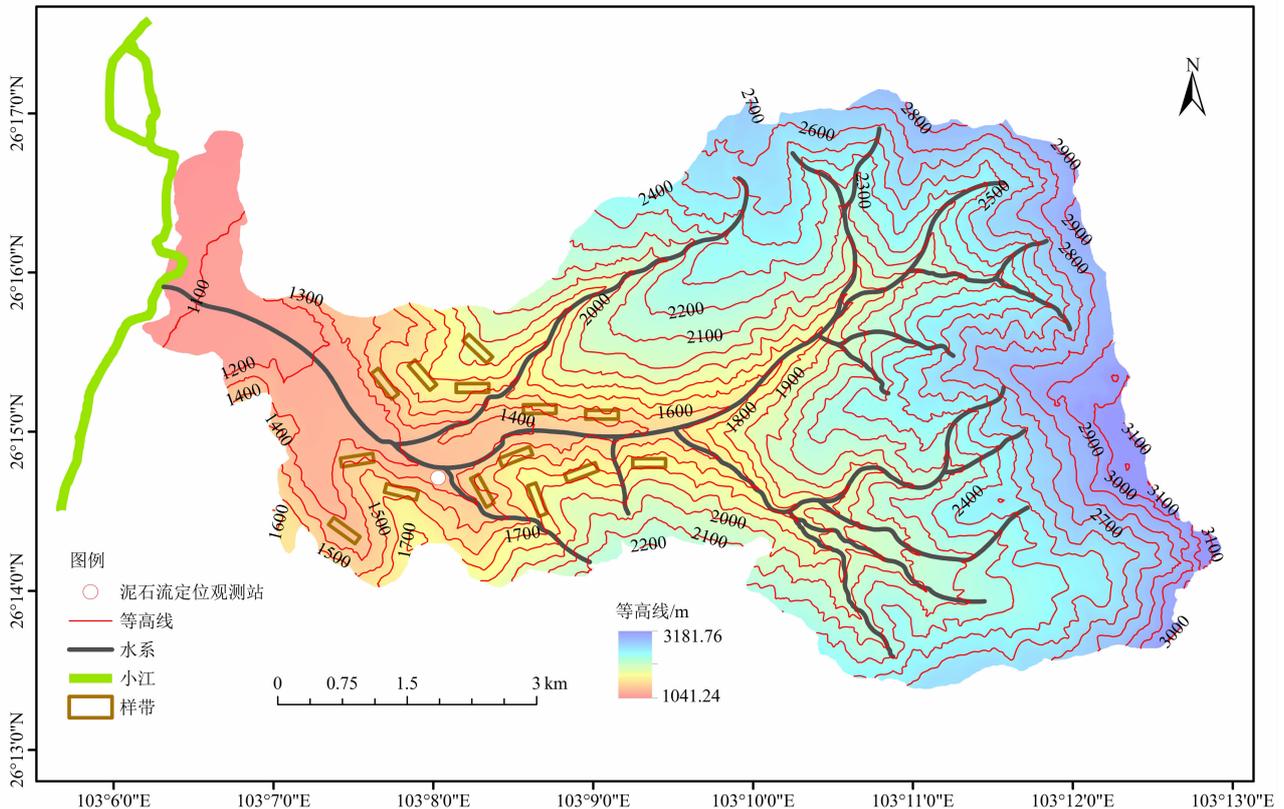


图1 蒋家沟流域地理位置图(审图号:GS(2019)3266号)

Fig. 1 Location of Jiangjia Gully, Yunnan, China (Base drawing review No. GS(2019)3266)

型特征,以5 m间隔水平划分3个10 m × 10 m的样地,即得到42个样地,记录样地内的乔木种类。在每个样地内设置一块5 m × 5 m的样方,即得到42个样方,用于进行灌木植被调查。在每个样方内设置一块1 m × 1 m的小样方,即得到42个小样方,用于进行草本植被调查。在调查过程中,使用手持GPS测定样方的经纬度和海拔高度,并记录坡度、坡向和植被覆盖度等信息。

1.3 样品采集与处理

在前期样方调查基础上,对42个样地内的灌木重要值进行计算,确定在各样带内占前五重要值的共同物种为铁扫帚和坡柳。进行植物样品采集时,将每个1 m × 1 m的小样方划分为4个50 cm × 50 cm的小样方点,选取同一条对角线上的2个50 cm × 50 cm的小样方点,采用刈割法——不区分灌木和草本的类型,收集地上草本及铁扫帚和坡柳。混合后装入含有变色硅胶的自封袋密封保存,共得到42份植物地上部分混合样。在相同位置采用完整土块法挖取长宽为50 cm、深度为20 cm的土块,

清理所有根系表面泥土和杂物,混合后装入自封袋中密封保存,共得到42份根系混合样。采用五点取样法,在每个1 m × 1 m小样方对角线及中心点的位置选取五点,采集0 ~ 10 cm的土层内的土壤,混合后装入自封袋密封保存,共得到42份土壤混合样。样品处理后,使用碳氮元素分析仪(VARIO MAX)测定植物碳(C)、氮(N)含量和土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)含量;使用碱熔-钼锑抗显色法(LY/T 1232—1999)测定土壤全磷(TP)含量;最后使用电感耦合等离子体发射光谱仪(PE OPTIMA 8000)分析植物磷(P)、钾(K)含量和土壤全钾(TK)含量。

1.4 数据处理

使用Excel 2016进行数据整理,利用SPSS 22.0进行单因素方差分析(One-way ANOVA)、LSD多重比较和Pearson相关性分析等。同时,运用Origin 9.0绘制植被和土壤的含量、化学计量比和差异性图,并用R 4.2.1中的Corrplot包绘制灌草层植被地上、根系和土壤的C、N、P含量及其化学计量比的

Pearson 相关性图。图中标示的不同小写字母表示灌草层植被地上部分、根系、土壤的同一指标差异显著 ($P < 0.05$)。

2 结果与讨论

2.1 干热河谷区灌草层植被地上、根系和土壤的养分分布特征

蒋家沟干热河谷区灌草层植被与土壤的 C、N、P、K 含量分布如图 2 所示。C、N 含量均表现为地上 > 根系 > 土壤, 差异显著; P 含量表现为灌草层植被的地上显著高于根系和土壤; K 含量则表现为土壤 > 地上 > 根系, 差异显著。干热河谷区灌草层植被地上和根系相比于土壤, 具有较高的 C、N、P 含量, 其中植被地上部分的元素含量更高; 反之, 土壤则具有较高的 K 含量。

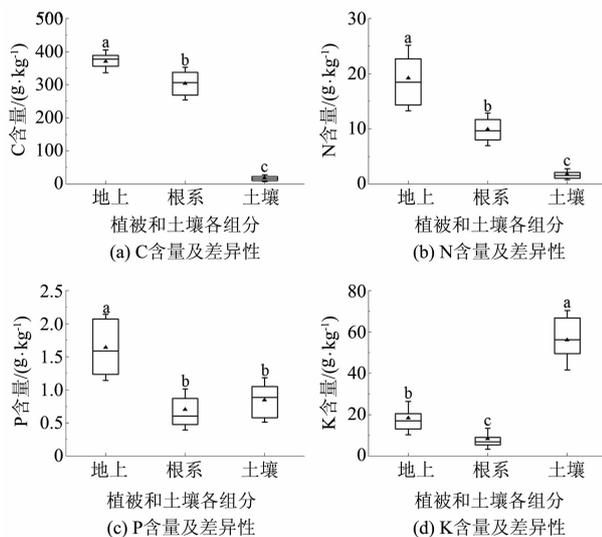


图 2 干热河谷区灌草层植被和土壤的 C、N、P、K 含量和差异性

Fig. 2 C, N, P, K contents in shrub-grass vegetation and soil in subtropical dry-hot valley zone

注: 不同小写字母表示同一元素不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$)。

蒋家沟干热河谷区灌草层植被显示出独特的养分特征。地上部分的 C 含量为 364.75 ~ 375.31 g/kg, 根系含量为 295.67 ~ 310.79 g/kg, 均低于金沙江和元江地区的相应 C 含量 (428.64 g/kg、408.54 g/kg)^[15-16]。植被地上 N、P、K 含量分别为 18.28 ~ 20.11 g/kg、0.66 ~ 0.75 g/kg 和 17.19 ~ 19.67 g/kg, 均高于金沙江地区 (6.51 g/kg、1.60 g/kg、9.62 ~ 10.10 g/kg)^[15,17], 同时叶片 K 含

量高于全国均值 (15.01 g/kg)^[18]。根系部分的四种元素含量与元江地区相比, 也有相似的趋势^[16]。这种低 C、高 N、P、K 的特征说明干热河谷区灌草层固碳能力较弱, 但对 N、P、K 的养分吸收能力较强。这可能与该地区特定的生态环境条件如地表植被稀疏、沟壑陡峭、旱季干旱和雨季地质灾害频发等有关。

在这种严苛的环境下, 植物通过优先向地上部分分配养分的策略达到最优状态, 促使植物增加体内保护性酶和蛋白质的合成, 降低了植物 C 的同化能力, 增强了 N、P、K 养分需求性^[19], 导致植物不同部位间养分含量存在差异, 形成不同于其他干热河谷植物的养分吸收策略。叶片储存了大部分根系吸收的养分, 用于植物生命活动^[20], 因此地上部分的 C、N、P、K 含量均显著高于根系。

土壤中的 SOC、TN、TP 和 TK 含量也是影响土壤肥力的重要指标^[21-22], 在一定程度上代表着整个土壤生态系统养分特征^[23]。干热河谷区灌草层土壤的 SOC 含量为 16.22 ~ 19.39 g/kg, 与金沙江地区一致 (16.86 g/kg)^[24] 但低于全国平均水平 (24.56 g/kg)^[25]。在干热河谷高温干燥环境下, 土壤有机碳分解加速, 导致土壤保持营养元素的能力降低^[26]。土壤 SOC 含量减小说明该区域土壤贫瘠, 有机碳含量低, 这与得出的植物低 C 的特征一致。尽管干热河谷区土壤 TN 含量在 1.64 ~ 1.93 g/kg, 高于金沙江地区 (1.33 g/kg)^[24], 但均值 (1.78 g/kg) 仍低于全国平均水平 (1.88 g/kg)^[25]。干热河谷主要由山地燥红土构成, 脱硅富铝化程度高, 易板结, 全氮和有机碳流失严重。优势植被易吸收土壤养分, 可能导致土壤进一步退化, 与以往研究得出的植被可以有效恢复土壤养分的观点不同。然而, 干热河谷区的土壤 TP 含量为 0.80 ~ 0.90 g/kg, 略高于金沙江地区 (0.78 g/kg)^[24] 和全国平均水平 (0.78 g/kg)^[25], 这可能是因为多须根植物通过根系分泌物和细根脱落的形式将养分传递到土壤中, 且高温促进了这一转化过程^[27], 这也印证了干热河谷区植物生长不受 P 元素限制的研究结果。整体上, 干热河谷区土壤的 SOC、TN、TP 含量显著低于灌草层植被, 但 TK 含量却显著高于植被。这可能是由于该地区土壤中大量存在的松散长石和云母矿物, 在高温下微生物将 K 元素分解为水溶性钾离

子,易吸附固定在土壤颗粒上。尽管酸性土壤的阳离子交换能力低,但干热气候雨量少,冲刷淋洗对 K 元素的损失较小,因此土壤中储存了足够的 K 元素供植物生长所需。这验证了前文根据植物体 N:K 和 P:K 得出的判断结果。

2.2 干热河谷区灌草层植被地上、根系和土壤的生态化学计量特征

蒋家沟干热河谷区灌草层植被、土壤的化学计量比的特征如图 3 所示。干热河谷区的 C:N、C:P、C:K、N:P、N:K 均表现为根系 > 地上 > 土壤,差异显著;P:K 表现为土壤显著低于植被的地上部分和根系。6 个计量比指标都表现为植被地上和根系元素含量显著大于土壤。

探究植物生态化学计量比有助于了解其养分利用效率和生长速率的特征^[19]。植物在固碳过程中,需要大量的蛋白酶和矿物质参与代谢,植物的 C:N、C:P、C:K 越高,植物对 N、P、K 养分的利用效率就越高^[19,29]。“生长速率假说”认为,高生长速率的植物具有较低的 C:N、C:P、N:P^[19,29]。干热河谷区灌草层植被叶片 C:P 和 N:P 与金沙江地区相似

(270.36 和 4.16)^[15],但 C:N 结果不一致;C:N、C:P、N:P 与元谋地区结果相似(26.44, 178.91, 6.99)^[16],均低于全国平均水平(30.90, 393.50, 12.70)^[18]。其原因可能为干热河谷土壤贫瘠、降水量少、蒸发量大,导致凋落物降解慢,腐殖质层薄,植物难以获取额外养分,与微生物竞争激烈,使得植物叶片普遍缺 N。为适应恶劣条件,干热河谷区的植物采取提高生长速率、降低养分利用效率的策略,最大化实现其对有限养分的利用。

N:P 可用于判断植物养分限制情况^[28]。干热河谷区灌草层植被地上和根系 N:P 值分别为 12.32 和 15.71,表明植物的生长发育均受 N 元素的限制。同时,植物 N:K 和 P:K 可表征植物受 K 元素限制的状况^[19]。干热河谷区灌草层植被地上 N:K 为 1.07 ~ 1.18, P:K 为 0.09 ~ 0.10,这说明干热河谷区植物生长不受 K 元素的限制。这与全国陆生植物普遍受到 P 元素的限制^[29]的情况不同,但与其他干热河谷灌草丛的研究结果相符^[15-16,24,29]。干热河谷由于其石质土壤和干旱松散堆积物的特质,微生物作用减弱,土壤中有机态氮不易转化为植物可吸

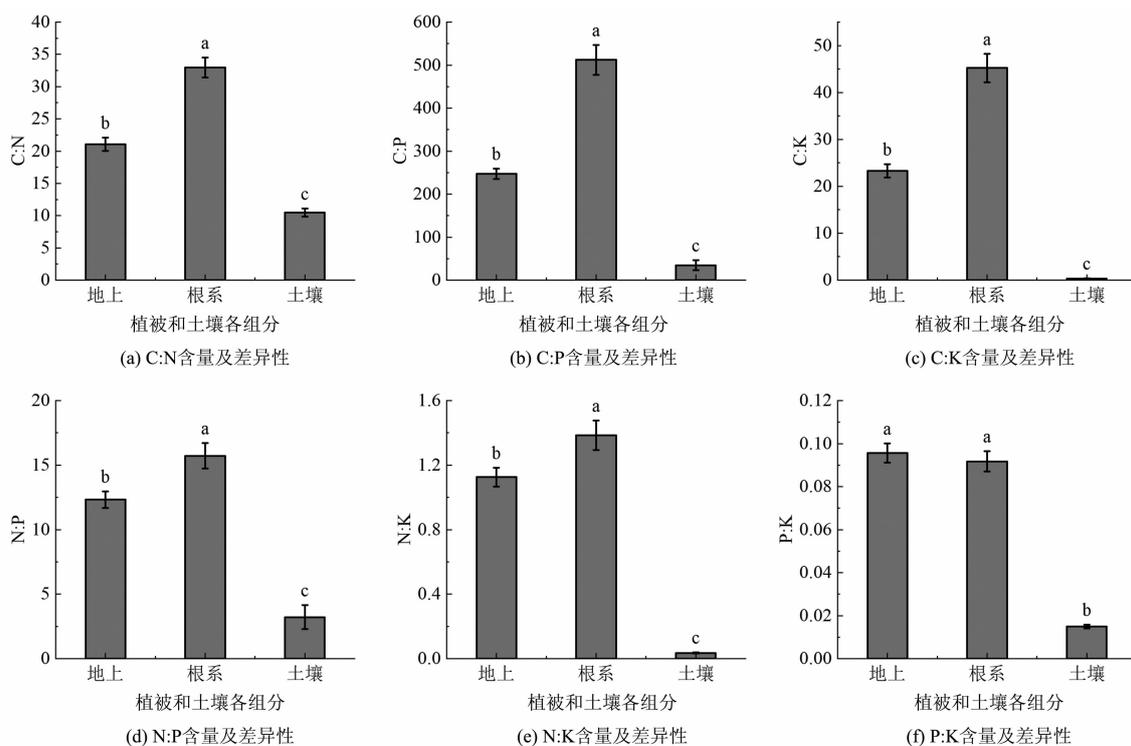


图 3 干热河谷区灌草层植被、土壤的化学计量比和差异性

Fig. 3 Differences of stoichiometric ratios of the shrub-grass vegetation and soil in subtropical dry-hot valley zone

注:不同小写字母表示同一元素不同处理之间差异显著($P < 0.05$)。

收利用的无机态氮;而 P 元素由于为沉积型循环,几乎不与外界环境发生交换,95%的 P 被固定在土壤,在常年的滑坡泥石流等灾害带来的径流和堆积中逐渐沉积在原有土壤之上;K 元素由于干热河谷特殊的成土母质以及植物体内的循环作用,在土壤中含量充足。因此,特定生态环境使得灌草层植被更易受到 N 元素的限制,而不受 P、K 元素的制约。

植物 C:N、C:P、C:K 可反映植物吸收氮、磷、钾营养元素时碳的固定转化能力^[30]。干热河谷区灌草层植被根系 C:N、C:P、C:K 均显著高于地上,因为地上叶片是生理代谢和生长速率最快的器官,叶片养分的积累有利于植物进行光合固碳,遵循“生长速率假说”,也与大部分陆生植物的研究结果相一致^[19]。

土壤内部微环境的养分循环特征通过土壤生态化学计量比体现,反映了养分元素在土壤中的协同变化。土壤微生物获得平衡营养的 C:N 约为 25^[30],而干热河谷区土壤 C:N 为 9.86 ~ 11.08,明显低于该平衡值,表明土壤矿化和氮素释放迅速。这是由于干热河谷区土壤的 C 元素含量较低,土壤较为贫瘠,导致微生物活动不旺盛。土壤 C:P 可表征土壤 P 元素的矿化能力,C:P 越高,则土壤 P 的有效性越高^[25]。干热河谷区土壤的 C:P 为 22.92 ~ 45.93,略高于金沙江地区结果(21.61)^[24],说明干热河谷区土壤的磷素含量相对丰富,但有效性较低。土壤 N:P 作为衡量 N 元素饱和状态的指标,能反映土壤营养物质在植物生长期间的供给情况^[32]。该区域土壤的 N:P 为 2.29 ~ 4.14,略高于金沙江地区

结果(1.69)^[24],但低于全国陆地土壤均值(5.2)^[25],说明干热河谷区土壤中 N 元素较为缺乏,可解释灌草层植被生长受 N 元素限制的规律。

2.3 干热河谷区灌草层植被地上、根系和土壤养分及生态化学计量特征的相关性

对蒋家沟干热河谷区灌草层植被、土壤自身的养分及化学计量比进行相关性分析(图 4)。植被地上部分的 C 与 N、P 无显著相关性,但与 C:P、N:K、C:K、P:K 呈显著正相关,与 K 呈显著负相关。此外,根系的 C 与 N 之间呈现显著正相关,土壤的 SOC 与 TN 之间也呈显著正相关。其余的养分及化学计量比之间的相关性则如图 4 所示。

蒋家沟干热河谷区灌草层植被和土壤的养分进行相关性分析,分析结果如图 5 所示。地上 C 与根系 C 呈显著正相关,与根系 K 呈显著负相关;地上 N、P、K 与根系 N、P、K 均呈显著正相关;地上 C 与土壤 K 无显著相关性,且根系的 C、N、P、K 与土壤多数不存在相关性。

对蒋家沟干热河谷区灌草层植被、土壤的化学计量比进行相关性分析(图 6)发现,植被根系与地上部分的 C:N、C:P、C:K 两两间及 N:P、N:K、P:K 间均呈显著正相关;地上部分的 N:K 与根系的 C:P、C:K、N:P 呈显著正相关,P:K 与根系 C:N、C:K 间呈显著正相关,C:P 和 C:K 分别与根系 N:P 和 N:K 呈显著正相关;地上部分的 N:P 与根系的 C:N、P:K 呈显著负相关。植被地上的 C:N、C:K 和根系的 C:N 与土壤均呈显著负相关,土壤 N:P 与根系 N:P 呈显著正相关。然而,地上部分与土壤的化学计量比大多

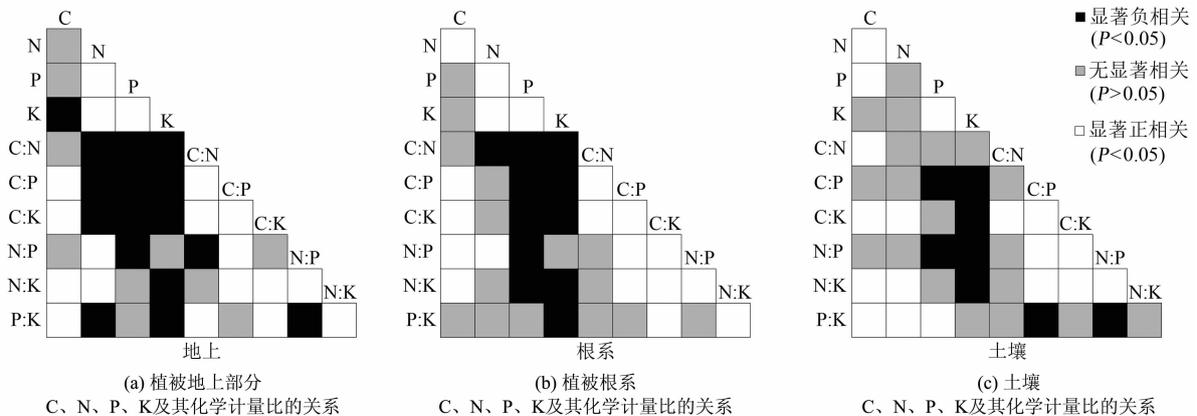


图 4 干热河谷区灌草层植被地上、根系和土壤自身的化学计量比相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis of the stoichiometric ratios in the aboveground, roots and soil itself of shrub-grass vegetation in subtropical dry-hot valley zone

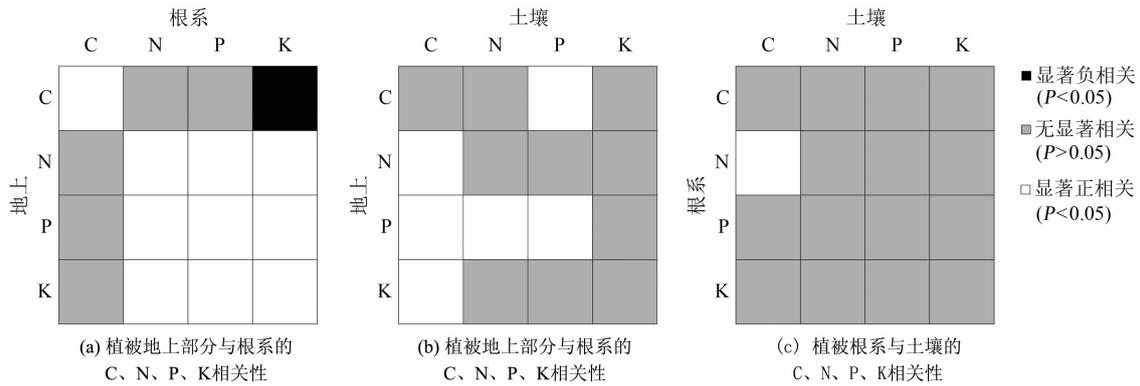


图5 干热河谷区灌草层植被地上、根系和土壤的 C、N、P、K 相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis of the same element in the aboveground part, roots and soil of shrub-grass vegetation in subtropical dry-hot valley zone

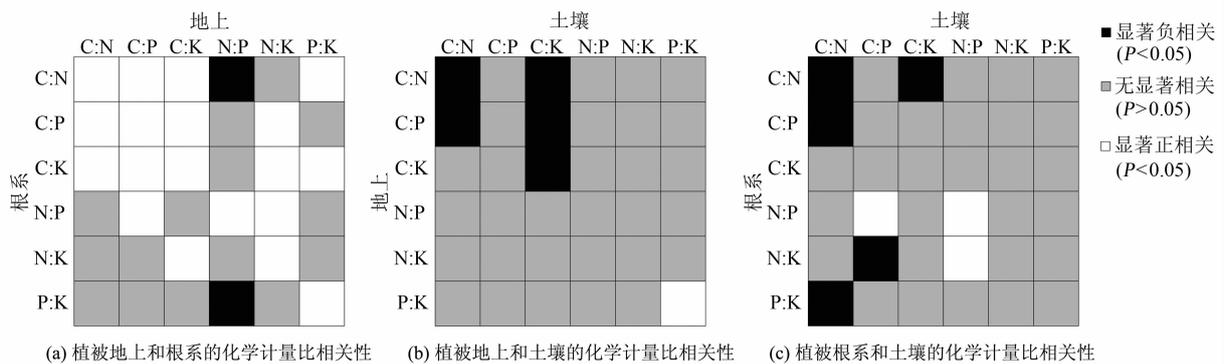


图6 干热河谷区灌草层植被地上、根系和土壤的化学计量比相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis of the same stoichiometric ratio in the aboveground, roots and soil of shrub-grass vegetation in subtropical dry-hot valley zone

都无显著相关性。

干热河谷区灌草层植被地上部分和根系的 C 呈显著正相关,与白沟引河地区结果^[32]相似,说明地上和根系的 C 含量具有协同性。同时,植被地上的 N、P、K 含量与根系均呈显著正相关,这是因为地上器官生长发育所需的 N、P、K 主要来源于根系吸收。这三种元素在植物体内均呈显著的正相关关系,说明植物体内 N、P、K 间也具有明显的协同作用。此外,叶片 C 含量和根系 K 含量呈负相关关系,与粤北石灰岩地区植物结果一致^[33]。叶片中的 C 元素主要来自植物光合作用,而 K 元素主要以离子态形式存在于地壳中,在土壤中移动扩散速度慢,根系从土壤中获取 K 存在滞后性。干旱高温胁迫可能导致植物叶片为满足光合效率,从根系吸收 K 而降低根系 K 含量。植物地上 C 与 K 的负相关性以及地上 C 与土壤 K 的无显著相关性等结果也证

明了植物体内 C、K 元素的来源和转化速率不同。

灌草层植被根系的 C、N、P、K 元素与土壤多数不存在相关性,可能是由于蒋家沟流域的自然灾害和人为因素导致土壤结构发生改变,养分随地表径流流失严重,从而破坏了土壤与植被养分的稳定性^[20]。干热河谷区根系的 C、N 含量以及土壤 SOC 和 TN 的含量均呈显著正相关,这是因为土壤有机碳含量的高低影响氮素在土壤中的储存和转化过程^[31]。另一方面,干热河谷叶片 N 与 P 正相关符合高等陆生植物叶片元素计量的普遍特征,说明灌草层植物已适应干热河谷恶劣环境,健康稳定生长。叶片 C 与 N、P 无显著相关性,且叶片与土壤化学计量比大多都无显著相关,与元江地区^[16]和塔里木河荒漠区^[34]灌木叶片得出的结果一致。叶片生态化学计量特征是一种性状,植物通过改变性状来适应环境,与土壤养分限制关系不大^[35],表明了干热河

谷气候区植物适应了高温干旱恶劣环境,采用了快速吸收磷元素的生存策略来适应生境。

最后,干热河谷区灌草层植被地上 C: N、C: P、C: K、N: P、N: K、P: K 与根系间均呈显著或极显著正相关关系,进一步印证了植物的生长和代谢是一个整体性过程,植物地上部分和根系有协同性。植被地上和根系的 C: N 与土壤均呈显著负相关,与巴音布鲁克草原地区^[36]的结果不一致。这可能是由于干热气候和水土流失影响,表层富含有机质的土壤大量淋失,枯枝落叶和植物残体对土壤的养分返还效率较低。此外,土壤 N: P 与根系 N: P 呈显著正相关,根系对土壤养分变化的响应更明显。这主要是由于干热河谷区土壤磷素有效性低,植物根系在缺 P 条件下会产生根系分泌物溶解土壤中难溶性磷酸盐来获取磷素^[38],同时从土壤中吸收无机氮和有机氮维持植物正常生长发育。值得注意的是,虽然植物叶片对 K 的需求量大,但土壤储存 K 速率慢。因为土壤全钾中仅有占比不到 10% 的交换性钾和非交换性钾可供植物利用,占比 90% 以上的矿物态钾释放缓慢难以被植物利用^[38],这可能是导致叶片与土壤 C: K 呈负相关的原因。

3 结论

本研究采用单因素方差分析和 Pearson 相关性分析方法,分析了蒋家沟流域干热河谷区典型灌草层植被地上、根系和土壤的养分分布和生态化学计量特征及其相关性,得出结论如下。

(1) 与全国陆地植物平均水平相比,干热河谷区灌草层植被地上和根系表现出低 C、高 N、P、K 的特点;土壤表现出低 C 高 P 的特点。

(2) 灌草层地上部分的 4 种养分含量均显著高于根系。除土壤 K 含量显著高于植被地上和根系,植被地上 C、N、P 含量均显著高于土壤;除 P: K 外,其余 5 种化学计量比均表现为根系 > 地上 > 土壤。

(3) 灌草层植被地上、根系 N、P、K 含量及生态化学计量特征间均呈正相关,土壤与植被的 C、N、P、K 含量和化学计量比多数不存在相关性。

(4) 植被地上部分 C: N (21.07)、C: P (247.05)、N: P (12.32) 均低于根系(分别为 32.95、512.10 和 15.71),符合“生长速率假说”。根据

N: P、N: K、P: K 判断,灌草层植被生长不受 P、K 限制而更易受到 N 的限制。根据 C: N、C: P、N: P 判断,与全国表层土壤平均值相比,土壤贫瘠缺乏 C、N 元素,P 有效性较低。

(5) 植被地上和根系在养分的分配过程中具有协同性。

参考文献 (References)

- [1] 范建容, 杨超, 包维楷, 等. 西南地区干旱河谷范围及分区统计分析[J]. 山地学报, 2020, **38**(2): 303 - 313. [FAN Jianrong, YANG Chao, BAO Weikai, et al. Distribution scope and district statistical analysis of dry valleys in southwest China [J]. Mountain Research, 2020, **38**(2): 303 - 313] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000511
- [2] 吴雨晴, 田赞, 周建琴, 等. 不同放牧制度草地土壤碳氮磷化学计量特征[J]. 应用与环境生物学报, 2019, **25**(4): 801 - 807. [WU Yuqing, TIAN Bin, ZHOU Jianqin, et al. Ecological stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen, and phosphorus under different grazing regimes [J]. Journal of Application and Environmental Biology, 2019, **25**(4): 801 - 807] DOI: 10.19675/j.cnki.1006-687x.2018.10004
- [3] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, **28**(8): 3937 - 3947. [WANG Shaoqiang, YU Guirui. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, **28**(8): 3937 - 3947] DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2008.08.054
- [4] 阿斯太肯·居力海提, 董乙强, 李靖, 等. 禁牧对不同气候区蒿类荒漠植被和土壤养分及化学计量特征的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2021, **35**(11): 157 - 164. [Asitaiken · Julihaiti, DONG Yiqiang, LI Jing, et al. Effects of grazing exclusion on nutrition and stoichiometry characteristics of Artemisia desert vegetation and soil [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, **35**(11): 157 - 164] DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2021.311
- [5] 朱永官, 段桂兰, 陈保冬, 等. 土壤-微生物-植物系统中矿物风化与元素循环[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, **44**(6): 1107 - 1116. [ZHU Yongguan, DUAN Guilian, CHEN Baodong, et al. Mineral weathering and element cycling in soil-microorganism-plant system [J]. Science China: Earth Sciences, 2014, **44**(6): 1107 - 1116] DOI: 10.1007/s11430-014-4861-0
- [6] 魏雅丽, 郭芬芬, 陈安强, 等. 元谋干热河谷植被恢复对土壤酶活性的影响特征[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(1): 100 - 106. [WEI Yali, GUO Fenfen, CHEN Anqiang, et al. Effects of Vegetation Restoration on Soil Enzyme Activity in Yuanmou Dry-hot Valley, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, **30**(1): 100 - 106] DOI: CNKI: SUN: NHBH.0.2011-01-018

- [7] 校亮,熊东红,张宝军,等.干热河谷冲沟岸葛藤不同覆被状况及土壤性质差异分析[J].生态学报,2018,38(14):5047-5055.[XIAO Liang, XIONG Donghong, ZHANG Baojun, et al. Analysis of soil properties in gully banks under different coverage of Kudzu in a dry-hot valley region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(14): 5047-5055] DOI:10.5846/stxb201705130883
- [8] 韩姣姣,段旭,赵洋毅.金沙江干热河谷典型林草植被下坡面土壤水分分布控制因素[J].东北林业大学学报,2018,46(4):29-34+38.[HAN Jiaojiao, DUAN Xu, ZHAO Yangyi. Dominating Factors of Soil Moisture Distribution in Typical Forest Vegetation Slopes in Dry Hot Valley Area of Jinsha River [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2018, 46(4): 29-34+38] DOI:10.13759/j.cnki.dlxb.2018.04.006
- [9] 余杭,潘佳虹,杨柳生,等.金沙江干热河谷优势草本植物生物量与土壤物理性质的关系[J].应用与环境生物学报,2021,27(4):884-892.[YU Hang, PAN Jiahong, YANG Liusheng, et al. Relationship between biomass of dominant herbaceous plants and soil physical properties in a dry-hot valley area of the Jinsha River [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2021, 27(4): 884-892] DOI:10.19675/j.cnki.1006-687x.2020.11007
- [10] 贺静雯,刘颖,李松阳,等.蒋家沟流域植物群落灌草层数量分类、排序及其生境解释[J].应用与环境生物学报,2020,26(2):451-459.[HE Jingwen, LIU Ying, LI Songyang, et al. Quantitative classification, sorting, and habitat interpretation of the shrub and grass layers of the plant communities in the Jiangjiagou Watershed [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2020, 26(2): 451-459] DOI:10.19675/j.cnki.1006-687x.2019.05043
- [11] 林勇明,葛永刚,王道杰,等.山区县乡公路建设对沿线景观格局的影响研究——以昆明市东川区蒋家沟小流域为例[J].长江流域资源与环境,2016,25(10):1566-1575.[LIN Yongming, GE Yonggang, WANG Daojie, et al. Impacts of county road construction on landscape pattern along the roads in mountainous area—a case study in Jiangjia watershed, Dongchuan district, Kunmin city [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(10): 1566-1575] DOI:10.11870/cjlyzyyhj201610011
- [12] 张有富.干热河谷气候区荒漠生物治理技术——以东川蒋家沟大凹子村为例[J].山地研究,1998,16(3):248-251.[ZHANG Youfu. The forest engineering technique on desert slope of dry hot valley—Dawazi countryside in Jiangjia Valley, Dongchuan City for example [J]. Mountain Research, 1998, 16(3): 248-251] DOI:10.1088/0256-307X/15/12/025
- [13] 张有富.蒋家沟流域的森林植被与泥石流[J].山地研究,1987,5(4):213-217.[ZHANG Youfu, Vegetation destruction and debris flow disasters in the Jiangjia Ravine [J]. Mountain Research, 1987, 5(4): 213-217] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.1987.04.006
- [14] 杨仁文,叶明富,陈精日.云南蒋家沟泥石流运动要素观测数据整编[J].山地研究,1998,16(4):338-341.[YANG Renwen, YE Mingfu, CHEN Jingri. Research on database of the debris flow motion characteristics in Jiangjia Gully [J]. Mountain Research, 1998, 16(4): 338-341] DOI: 10.1038/sj.cr.7290029
- [15] 阮长明,唐国勇,孙永玉,等.金沙江干热河谷不同植被类型植物叶片碳氮磷生态化学计量特征[J/OL].中南林业科技大学学报,2023(9):97-104.[RUAN Changming, TANG Guoyong, SUN Yongyu, et al. Ecological stoichiometry of leaf C, N and P of different vegetation types in the Dry-Hot Valley of the Jinsha River [J/OL]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2023(9): 97-104] DOI:10.14067/j.cnki.1673-923x.2023.09.010
- [16] 黄耀华,蒲文彩,余志祥,等.元江干热河谷典型植物的叶片化学计量特征[J].云南大学学报(自然科学版),2021,43(4):796-805.[HUANG Yaohua, PU Wencai, YU Zhixiang, et al. Stoichiometric characteristics of leaves of typical plants in the dry-hot valley of Yuanjiang [J]. Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition, 2021, 43(4): 796-805] DOI: 10.7540/j.ynu.20200220
- [17] 闫帮国,何光熊,李纪潮,等.生态系统恢复后干热河谷植物叶片N、P、K含量及物种优势度的变化[J].应用生态学报,2013,24(4):956-960.[YAN Bangguo, HE Guangxiong, LI Jichao, et al. Changes of plant leaf N, P, and K concentrations and species dominance in an arid-hot valley after ecosystem restoration [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(4): 956-960] DOI:10.13287/j.1001-9332.2013.0275
- [18] 秦海,李俊祥,高三平,等.中国660种陆生植物叶片8种元素含量特征[J].生态学报,2010,30(5):1247-1257.[QIN Hai, LI Junxiang, GAO Sanping et al. Characteristics of leaf element contents for eight nutrients across 660 terrestrial plant species in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(5): 1247-1257]
- [19] 孔维苇,王晓锋,卢虹宇,等.三峡库区消落带4种典型草本植物的生态化学计量特征[J].生态学报,2020,40(13):4493-4506.[KONG Weiwei, WANG Xiaofeng, LU Hongyu, et al. Ecological stoichiometry of four typical herbaceous species in the littoral zone of three gorges reservoir [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(13): 4493-4506] DOI:10.5846/stxb201911152464
- [20] 刘颖,贺静雯,余杭,等.干热河谷优势灌木细根、粗根与叶片养分(C、N、P)含量及化学计量比[J].山地学报,2020,38(5):668-678.[LIU Ying, HE Jingwen, YU Hang, et al. Nutrients(C,N,P) contents and stoichiometric ratios of Fine root, coarse root and leaf in dominant shrubs in dry-hot Valley [J]. Mountain Research, 2020, 38(5): 668-678] DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000544

- [21] Chander K, Goyal S, Nandal D P, et al. Soil organic matter, microbial biomass and enzyme activities in a tropical agroforestry system [J]. *Biol Fert Soils*, 1998, **27**(2): 168 – 172. DOI:10.1007/s003740050416
- [22] Morrison I K, Foster N W. Fifteen-year change in forest floor organic and element content and cycling at the Turkey Lakes watershed [J]. *Ecosystems*, 2001, **4**(6): 545 – 554. DOI:10.1007/s10021-001-0028-x
- [23] 赵越, 罗志军, 廖牧鑫, 等. 泰和县耕地土壤养分空间及影响因素[J]. *水土保持学报*, 2018, **32**(5): 296 – 303. [ZHAO Yue, LUO Zhijun, LIAO Muxin, et al. Study on the spatial distribution of soil nutrients and its influencing factors in the cultivated land of Taihe County [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, **32**(5): 296 – 303] DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.05.046
- [24] 阮长明, 杜寿康, 孙永玉, 等. 金沙江干热河谷不同区段土壤碳氮磷化学计量和酶活性研究[J]. *环境科学研究*, 2022, **35**(11): 2486 – 2494. [RUAN Changming, DU Shoukang, SUN Yongyu, et al. Stoichiometry of Soil Carbon, Nitrogen and Phosphorus and Soil Enzyme Activity at Various Reaches of the Dry-Hot Valley of Jinsha River [J]. *Research of Environmental Sciences* [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, **35**(11): 2486 – 2494] DOI:10.13198/j.issn.1001-6929.2022.07.21
- [25] TIAN Hanqin, CHEN Guangsheng, ZHANG Chi, et al. Pattern and variation of C: N: P ratios in China's soils: a synthesis of observational data [J]. *Biogeochemistry*, 2010, **98**(3): 139 – 151. DOI:10.1007/s10533-009-9382-0
- [26] 丁雪丽, 韩晓增, 乔云发, 等. 农田土壤有机碳固存的主要影响因素及其稳定机制[J]. *土壤通报*, 2012, **43**(3): 737 – 744. [DING Xueli, HAN Xiaozeng, QIAO Yunfa, et al. Sequestration of Organic Carbon in Cultivated Soils: Main Factors and Their Stabilization Mechanisms [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, **43**(3): 737 – 744] DOI:10.19336/j.cnki.trtb.2012.03.039
- [27] Ågren G I. The C: N: P stoichiometry of autotrophs-theory and observations [J]. *Ecology Letters*, 2004, **7**(3): 185 – 191. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2004.00567.x
- [28] HAN Wenxuan, FANG Jingyun, GUO Dali, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China [J]. *New Phytologist*, 2005, **168**(2): 377 – 385. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2005.01530.x
- [29] 闫洋洋, 王谢, 严坤, 等. 干热河谷区泥石流滩地不同景观类型土壤与微生物量C、N、P生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2023, **43**(11): 4734 – 4746. [YAN Yangyang, WANG Xie, YAN Kun, et al. C: N: P ecological stoichiometry characteristics of soil and microbes of different landscape types in debris flow beach of dry-hot valley [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(11): 4734 – 4746] DOI: 10.5846/stxb202110112858
- [30] 吴聪, 王金牛, 卢涛, 等. 汶川地震对龙门山地区山地土壤理化性质的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2012, **18**(6): 911 – 916. [WU Cong, WANG Jinniu, LU Tao, et al. Effect of Wenchuan earthquake on soil physical and chemical properties of the Longmen Mountain, Southwestern China [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2012, **18**(6): 911 – 916] DOI:10.3724/sp.j.1145.2012.00911
- [31] 孙骞, 王兵, 周怀平, 等. 黄土丘陵区小流域土壤碳氮磷生态化学计量特征的空间变异性[J]. *生态学杂志*, 2020, **39**(3): 766 – 774. [SUN Qian, WANG Bing, ZHOU Huaiping, et al. Spatial variation of ecological stoichiometry of soil C, N and P in a small catchment of loess hilly area [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, **39**(3): 766 – 774] DOI:10.13292/j.1000-4890.202003.037
- [32] 刘辉, 韩永伟, 刘华民, 等. 白沟引河流域草本植被碳氮磷含量及化学计量学分析[J]. *生态科学*, 2023, **42**(1): 155 – 163. [LIU Hui, HAN Yongwei, LIU Huamin, et al. Analysis of concentration and stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in herbage in Baigou River basin [J]. *Ecological Science*, 2023, **42**(1): 155 – 163] DOI:10.14108/j.cnki.1008-8873.2023.01.018
- [33] 刘强, 林伟通, 詹红星, 等. 粤北石灰岩山地天然次生林优势乔木林分土壤-根系-叶片生态化学计量特征[J]. *防护林科技*, 2021(6): 5 – 10 + 18. [LIU Qiang, LIN Weitong, ZHAN Hongxing, et al. Ecochemical Metrological Characteristics of Soil, Root and Leaf in the Dominant Arbor Stand in Natural Secondary Forest in Limestone Mountain Area of Northern Guangdong Province [J]. *Protection Forest Science and Technology*, 2021(6): 5 – 10 + 18] DOI:10.13601/j.issn.1005-5215.2021.06.002
- [34] 罗艳, 贡璐, 朱美玲, 等. 塔里木河上游荒漠区4种灌木植物叶片与土壤生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2017, **37**(24): 8326 – 8335. [LUO Yan, GONG Lu, ZHU Meiling, et al. Stoichiometry characteristics of leaves and soil of four shrubs in the upper reaches of the Tarim River Desert [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(24): 8326 – 8335] DOI: 10.5846/stxb201611222379
- [35] 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 Dehui, WEN Zhongming, WANG Hongxia, 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, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(20): 6420 – 6430] DOI: 10.5846/stxb201504090720
- [36] 阿依敏·波拉提, 安沙舟, 董乙强, 等. 巴音布鲁克高寒草原不同退化程度土壤化学计量比特征[J]. *新疆农业科学*,

- 2018, **55**(5):957–965 [AYIMIN Bolati, AN Shazhou, DONG Yiqiang, et al. Soil stoichiometry characteristics in different degradation stages of alpine steppe in Bayanbulak [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2018, **55**(5): 957–965] DOI:10.6048/j.issn.1001–4330.2018.05.020
- [37] Fox T R, Comerford N B. Rhizosphere phosphatase activity and phosphatase hydrolyzable organic phosphorus in two forested spodosols [J]. Soil Biology & biochemistry, 1992, **24**(6): 579–583. DOI:10.1016/0038–0717(92)90083–A
- [38] YIN Hui, ZHENG Hongwei, ZHANG Bo, et al. Stoichiometry of C: N: P in the roots of *Alhagi Sparsifolia* is more sensitive to soil nutrients than aboveground organs [J]. Frontiers in Plant Science. 2021, **12**:698961. DOI: 10.3389/fpls.2021.698961

Nutrient Distribution and Ecological Stoichiometry Characteristics of Shrub-Grass Layer Vegetation and Soil in the Jiangjia Gully, China

GUO Yiting^{a,b}, ZHANG Siying^a, LIU Ying^{a,b}, SHEN Wanling^a, LIN Yongming^{a,b*}

(*a. College of Forestry; b. Key Laboratory for Forest Ecosystem Process and Management of Fujian Province, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China*)

Abstract: The dry-hot valley of the Jiangjia Gully in the upper reaches of the Jinsha River is a typical basin with severe ecological degradation, which urgently needs restoration and management because of the frequent occurrence of mudslides and landslides, sparse vegetation, soil structure disorganization, and fragile ecological environment. Vegetation and soil play a crucial role in the restoration and management of degraded ecosystems. Previous research on vegetation and soil in this basin focused on analyzing the coupling relationship between vegetation and soil from a perspective of a single species or soil enzyme activity. However, there was a lack of research on the coupling mechanism between vegetation and soil nutrient content in the scrub layer, and the vegetation-soil coupling mechanism was not yet clear.

In this study, typical shrub-stratum vegetation in the dry-hot river valley areas of the Jiangjia Gully was collected as research object. It investigated nutrient distribution and ecological stoichiometric characteristics of carbon (C), nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) in the aboveground vegetation, root systems, and soil, as well as their correlation.

It found that (1) compared with national average of terrestrial plants, the aboveground and root systems of the shrub-grass layer in dry-hot river valley area were characterized by low carbon, high nitrogen, phosphorus and potassium, whereas the soil was low in carbon and high in phosphorus. (2) The C, N, P and K contents of aboveground vegetation parts were significantly higher than those of the root system and the contents of C, N and P in the aboveground vegetation were significantly higher than those in the soil. K content in the soil ($56.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) was significantly higher than that in the aboveground vegetation ($18.43 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and the root system ($8.41 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). With the exception of P: K (aboveground $0.10 >$ root system $0.09 >$ soil 0.01), the remaining five stoichiometric ratios showed the following order: root system $>$ aboveground $>$ soil. (3) Positive correlations were found between aboveground and root system N, P, and K contents and the ecological stoichiometric characteristics of vegetation in the scrub layer, whereas most C, N, P, and K contents and stoichiometric ratios of soil and vegetation were not correlated. (4) The aboveground C: N (21.07), C: P (247.05), and N: P (12.32) ratios of vegetation were lower than those of the root system (32.95, 512.10 and

15.71, respectively), which was consistent with the “growth rate hypothesis”. According to the N:P, N:K and P:K ratios, the growth of the shrub and grass layer vegetation was not limited by P and K, but was more vulnerable to N limitation. Comparison of the C:N, C:P and N:P ratios with the national average of surface soil, showed that the soil was barren and lacked C and N while P availability was low. (5) Aboveground vegetation and root systems acted synergistically in the process of nutrient allocation. In summary, the plant coping strategy under climatic conditions of dry and hot river valley area is to increase the growth rate and reduce nutrient utilization efficiency.

Ecological restoration of the Jiangjia Gully watershed should focus on soil organic carbon and nitrogen content and reduce the limitation of N to plants. This study can provide a reference for improving the ecological environment of the Jiangjia Gully watershed.

Key words: soil nutrients; stoichiometric ratio; analysis of relationship; dry-hot valley zone; Jiangjia Gully

(责任编辑 李嵘)