

天山云杉林下优势草本植物化学计量内稳定性特征

阿里木·买买提¹,李翔¹,卡哈尔曼·恰依扎旦²,常顺利³

(1.新疆林业科学院 森林生态研究所,新疆 乌鲁木齐 830063;2.哈密市生态修复保护中心,新疆 哈密 839000;
3.新疆大学 资源与环境科学学院,绿洲生态教育部重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830046)

摘要:为探讨新疆天山云杉林下优势草本植物的生态化学计量变化特征,以天山北坡海拔2 000~2 800 m范围内天然云杉林下优势草本植物天山羽衣草为研究对象,分别测定天山羽衣草地上部、根系和土壤的C、N、P、K含量,并分析其生态化学计量特征及内稳定性。结果表明,1)天山羽衣草地上部养分含量低海拔区域高于高海拔区域,根系养分含量高海拔区域高于低海拔区域,其中,海拔Ⅱ和Ⅳ的土壤养分含量高于海拔Ⅰ和Ⅲ($P<0.05$);2)天山羽衣草地上部C:P、C:K、N:P、K:P低海拔区域大于高海拔区域;根系C:P、N:P和K:P呈现随海拔升高先增大后减小的趋势($P<0.05$),不同海拔土壤元素计量比差异不显著($P>0.05$),但呈现出低海拔区域高于高海拔区域的趋势;3)天山羽衣草地上部和根系养分特征与对应土壤养分特征相关性不显著($P>0.05$);4)天山羽衣草地上部和根系C、N、P、K元素计量比的内稳定性高于元素本身,C、N(稳态型)内稳定性高于P(弱稳态型)。

关键词:生态化学计量特征;内稳定性;天山羽衣草;海拔梯度

中图分类号:S791.18 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2022)02-0068-07

Nutrient and Stoichiometric Characteristics of Dominant Herbaceous in Spruce Forests
on the Northern Slope of Tianshan Mountains

Alim · Mamat¹, LI Xiang¹, Kahlman · Chayizadan², CHANG Shun-li³

(1. Institute of Forest Ecology, Xinjiang Academy of Forestry, Urumqi 830063, Xinjiang, China; 2. Hami Ecological Restoration and Protection Center, Hami 839000, Xinjiang, China; 3. Key Laboratory of Oasis Ecology, College of Resources and Environment Science, Ministry of Education / Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China)

Abstract: In order to explore the characteristics of ecological stoichiometric changes of dominant herbaceous plants under the spruce forest, a dominant herbage *Alchemilla tianschanica* occurring in the north slope of Tianshan Mountain, Xinjiang, with the altitudes ranged from 2 000 to 2 800 m was selected. The contents of carbon, nitrogen, phosphorus, and potassium in aboveground parts, roots and soil were measured. The ecological stoichiometric characteristics and internal stability were analyzed. The results showed that 1) the nutrient contents in the aboveground part at low-altitude area were higher than those at high-altitude area; the nutrient contents in roots at high-altitude area were higher than those at the low-altitude area. The soil nutrient contents at the altitudes 2 200—2 400 m and 2 600—2 800 m were higher than those at the altitudes 2 000—2 200 m and 2 400—2 600 m ($P<0.05$). 2) The ratios of C:P, C:K, N:P, and K:P of the aboveground parts of *A. tianschanica* at low-altitude area were larger than those at high-altitude area; the ratios of C:P, N:P, K:P in roots showed a trend of first increasing and then decreasing with the increase in altitude. There was no significant difference in soil element measurement ratios between different altitudes ($P>0.05$), and showed a trend of higher in low altitude area and lower in high altitude area. 3)

收稿日期:2021-04-01 修回日期:2021-09-06

基金项目:自治区公益性院所基本科研业务专项资金项目(KY2020015)。

第一作者:阿里木·买买提,副研究员。研究方向:林业有害生物防治及森林生态监测。E-mail:373260238@qq.com

No significant correlations of the nutrient characteristics were found between the aboveground parts and roots and corresponding soils ($P > 0.05$)。4) The internal stabilities of the stoichiometric ratios of C, N, P, and K stoichiometric for the above ground parts were higher than the element itself, while those of C and N (steady-state type) were higher than P (weak steady-state type)。

Key words: ecological stoichiometry characteristics; homeostasis; *Alchemilla tianschanica*; altitudinal gradient

生物生长过程的实质是生物体最基本的结构功能性物质C、N、P、K等的积累与其相对比例的调节^[1-2]。生态化学计量学是从元素组成的角度探讨生态过程和生态作用中化学元素平衡的理论^[3-5],为研究生态系统中土壤—植物—环境三者之间相互作用提供了新手段。内稳态理论作为生态化学计量学主要理论,阐述了生物在变化的环境中具有维持体内元素组成在相对狭窄的范围内稳定的能力^[6-8]。在国外化学计量内稳定性研究多集中于藻类、浮游动物和草本植物^[9],对高等植物的研究较少,在物种水平上的研究更为缺乏^[10];国内内稳定性研究多集中于草原和湿地生态系统中的草本植物^[11-12],针对森林生态系统中的草本植物研究甚少。李玉霖等^[13]、刘洋等^[14]研究发现内稳定的高低受植物自身器官和环境因子共同影响,影响因子的差异使得不同植物生态化学计量内稳定性对环境的响应不一致。

森林生态系统中草本植物对促进能量流动和物质循环具有不可忽视的作用^[15],草本植物对于环境的变化比乔木层更为敏感,更容易在较短时间内反映环境带来的影响^[16]。天山云杉是天山山脉的地带性植被,在水源涵养、保持水土等生态功能方面发挥着重要作用,其林下分布着季相变化明显的草本层。目前,对草本层物种组成和区系特征方面已开展较多研究^[17-18],但对草本植物的养分适应机制研究较少。因此,本研究以天山北坡中部天山云杉林下的优势草本植物天山羽衣草(*Alchemilla tianschanica*)为研究对象,比较不同海拔天山羽衣草的C、N、P、K含量及计量比的差异性,并结合土壤养分分析判断该区域草本植物生长过程中的营养限制因子,揭示其生态适应的化学计量学机制,为合理制定天山北坡生态系统保护与修复措施提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于天山北坡乌鲁木齐县中国森林生态系统研究网络(CFERN, China forest ecology research net)天山森林生态系统定位研究站(87°07'—87°28'E, 43°14'—43°26'N)。该区属温带大陆性气候,年总辐射量达 5.85×10^5 J/(cm²·a),年均气温

约为2~3℃,历年极端最高温为30.5℃,极端最低温为-30.2℃,年降水量400~600 mm,雨季集中在6—8月,最大积雪深度为65 cm,年蒸发量980~1 150 mm,年均相对湿度65%,无霜期89 d, ≥ 10 ℃积温1 170.5℃。该区植被类型以天山云杉(*Picea schrenkiana*)纯林为主,森林覆盖率达60%,郁闭度0.4~0.8。林下草本主要有天山羽衣草(*A. tianschanica*)、老鹳草(*Geranium rotundifolium*)、羊角芹(*Aegopodium podagraria*)等,林下土壤为山地灰褐色森林土。

1.2 样品采集

2020年8月,以天山北坡中部不同海拔的天山羽衣草为研究对象,选择4个海拔区域(I:2 000~2 200 m、II:2 200~2 400 m、III:2 400~2 600 m、IV:2 600~2 800 m),在每个区域内随机设置10个采样点,各采样点水平距离大于100 m。在每个采样点布设1 m×1 m的样方进行草本调查,调查项目包括株数、高度、盖度及群落高度。调查结束后采集样方天山羽衣草地上部(枝叶)和根系带回实验室进行养分分析。在每个样方随机选取3个点,去除地表枯落物和植物残体后,用直径为5 cm的土钻取地表0~20 cm的土壤,将每个样方的土壤分别混合,室温下自然风干用于土壤养分测定。

1.3 样品分析

将采集的植物样品在105℃烘箱中杀青30 min,然后65℃下烘干至恒重,粉碎后备用。植物有机碳测定采用K₂Cr₂O₇-H₂SO₄氧化法;全N的测定采用H₂SO₄-HClO₄消化-靛酚蓝分光光度法;全P的测定采用H₂SO₄-HClO₄消化-钼锑抗比色法;全K的测定采用H₂SO₄-HClO₄消化-火焰光度法。

采集的土壤样品自然风干后,经研磨过0.150 mm筛备用。土壤有机碳的测定采用K₂Cr₂O₇氧化-外加热法;全N的测定采用半微量开氏法;全P的测定采用酸溶-钼锑抗比色法;土壤全K的测定采用NaOH碱熔-火焰光度计法^[19]。

1.4 数据处理

内稳定性指数用内稳定性模型 $y = cx^{1/H}$ 通过回归分析计算^[20]。式中,x为土壤中C、N、P、K含量

(%)及其比值, y 为植物地上部对应的 C、N、P、K 含量(%)及其比值, c 为常数, H 为植物内稳定性指数, $H > 4$ 为稳态型、 $2 < H < 4$ 为弱稳态型、 $4/3 < H < 2$ 为弱敏感型、 $H < 4/3$ 为敏感型。

采用 Excel 2007 和 SPSS 17.0 进行数据分析和处理。植物与土壤化学计量比均采用百分含量比表示。采用单因素方差(one-way ANOVA)分析比较不同海拔天山羽衣草和土壤养分化学计量内稳定的差异($P < 0.05$);采用 Pearson 相关分析方法计算天山羽衣草与土壤生态化学计量特征之间的相关系数。

2 结果与分析

2.1 不同海拔天山羽衣草及土壤养分含量变化特征

不同海拔区域,天山羽衣草地上部、根系和土壤的养分含量存在差异(表 1)。低海拔区域(I 和 II)天山羽衣草地上部养分含量高于高海拔区域(III 和 IV)。其中,C 含量变化范围为 30.77%~39.17%,区域 I 和 II C 含量显著高于 III 和 IV;N 含量变化范围为 0.87%~1.13%,不同海拔区域差异不显著;P 含量区域 II 显著高于区域 I;K 含量区域 I 显著高于区域 III。天山羽衣草根系养分含量高海拔区域(III 和 IV)高于低海拔区域(I 和 II)。其中,不同海拔高度 C、N 和 K 含量差异均不显著;P 含量区域 I 显著高于 III。土壤 C 含量变化范围为 8.25%~13.64%,区域 II 和 IV 显著高于 I 和 III;土壤 N 含量

区域 II 显著高于 I 和 III;土壤 P 含量变化范围为 0.09%~0.15%,土壤 K 含量变化范围为 1.46%~1.80%,区域 IV 的 P、K 含量均显著高于 I、II 和 III。

2.2 不同海拔天山羽衣草及土壤养分计量比

天山羽衣草地上部 C:N 随海拔升高呈先上升后下降的趋势,不同海拔之间的差异不显著(表 2)。C:P 随海拔上升逐渐下降,区域 I 的 C:P 显著高于 III 和 IV;区域 II 的 C:K 显著高于 IV;区域 I 的 N:P 显著高于 III;不同海拔区域 K:N 差异不显著;K:P 随海拔上升呈现先降低后升高的趋势,区域 I 的 K:P 显著高于其他海拔区域。天山羽衣草根系 C:N、C:K 和 K:N 在不同海拔区域之间差异均不显著。C:P、N:P 和 K:P 在区域 III 均为最大值,且区域 III 的 C:P 和 N:P 显著高于区域 I 和 II,区域 III 的 K:P 显著高于 I、II 和 III。不同海拔区域 C:N、C:P、C:K、N:P 和 K:P 差异不显著。

2.3 天山羽衣草内稳定性特征

天山羽衣草地上部、根系养分含量及计量比与土壤中对应养分含量及计量比相关性均不显著(表 3)。天山羽衣草地上部与根系 C、N、P 含量与土壤中对应的 C、N、P 含量呈正相关,其中天山羽衣草 P 含量与土壤相关系数较大;K 含量与土壤 K 含量呈负相关。天山羽衣草地上部养分含量计量比与土壤对应计量比除 C:N 外,均呈正相关性。根系养分含量计量比与土壤养分对应计量比 C:P、N:P、K:N、K:P 呈负相关。

表 1 不同海拔天山羽衣草和土壤 C、N、P、K 养分含量

Table 1 The C,N,P,K contents of *Alchemilla tianschanica* and soils at different altitudes

区域	海拔/m	有机碳/%	全 N/%	全 P/%	全 K/%
地上部	2 000~2 200(I)	39.17±8.13a	1.13±0.33a	0.16±0.03b	3.47±0.39a
	2 200~2 400(II)	40.48±6.30a	1.12±0.42a	0.20±0.05a	3.31±0.28ab
	2 400~2 600(III)	32.84±6.66b	0.87±0.30a	0.18±0.04ab	3.13±0.24b
	2 600~2 800(IV)	30.77±3.27b	0.97±0.48a	0.18±0.06ab	3.19±0.34ab
根系	2 000~2 200(I)	33.37±8.51a	1.76±0.02a	0.17±0.11a	1.47±0.20a
	2 200~2 400(II)	34.60±3.50a	1.77±0.02a	0.13±0.03ab	1.50±0.15a
	2 400~2 600(III)	34.85±4.89a	1.76±0.02a	0.09±0.03b	1.46±0.20a
	2 600~2 800(IV)	34.44±8.16a	1.78±0.00a	0.12±0.02ab	1.80±0.15a
土壤	2 000~2 200(I)	9.10±4.31b	0.05±0.02b	0.09±0.03b	1.47±0.20b
	2 200~2 400(II)	11.55±2.02a	0.08±0.04a	0.11±0.04b	1.50±0.15b
	2 400~2 600(III)	8.25±2.03b	0.05±0.02b	0.09±0.03b	1.46±0.20b
	2 600~2 800(IV)	13.64±4.38a	0.08±0.04ab	0.15±0.02a	1.80±0.15a

注:每一列不同小写字母表示不同海拔间差异显著($P < 0.05$)。下同。

分析天山羽衣草地上部和根系养分元素内稳定性指数,结果表明(表 4):天山羽衣草地上部 C、N、P、K 及其计量比均为稳定性,且元素计量比内稳定性高于元素本身,C:N 和 N:P 内稳定性较高。根系 P

和 K:P 均为弱稳定性,C:N、C:P、C:K 和 N:K 为稳定性,N 元素内稳定性最高。天山羽衣草地上部、根系中 K 元素、根系 C:N 和 K:N 不具内稳定性。

表2 不同海拔天山羽衣草及土壤中养分计量比

Table 2 The nutrient stoichiometric ratios of *A. tianschanica* and soil at different altitudes

区域	海拔/m	C : N	C : P	C : K	N : P	K : N	K : P
地上部	2 000~2 200(I)	38.0±14.3a	254.5±62.0a	11.4±2.5ab	7.3±2.3a	3.4±1.4a	22.6±4.6a
	2 200~2 400(II)	40.7±14.9a	214.1±57.5ab	12.3±2.4a	5.8±1.9ab	3.4±1.4a	17.7±4.8b
	2 400~2 600(III)	40.1±10.2a	194.0±55.3b	10.5±1.7ab	5.1±1.8b	3.9±1.0a	18.3±3.4b
	2 600~2 800(IV)	36.2±13.8a	184.3±60.6b	9.7±1.1b	6.0±3.9ab	3.7±1.4a	18.8±5.4b
根系	2 000~2 200(I)	19.0±4.8a	253.2±135.3b	21.3±7.5a	13.4±6.0b	0.9±0.1a	12.4±5.9b
	2 200~2 400(II)	19.6±2.1a	269.6±52.5b	21.7±3.2a	13.8±2.6b	0.9±0.1a	12.6±2.6b
	2 400~2 600(III)	19.8±2.8a	413.9±97.3a	23.1±4.6a	21.5±7.1a	0.9±0.1a	18.4±5.5a
	2 600~2 800(IV)	19.4±4.6a	306.9±110.8ab	24.1±8.1a	15.7±3.1ab	0.8±0.1a	12.7±1.0b
土壤	2 000~2 200(I)	201.2±116.2a	100.5±35.1a	6.2±3.1a	0.6±0.3a	37.2±18.8a	19.2±10.4a
	2 200~2 400(II)	164.9±76.4a	122.0±68.9a	7.7±1.4a	0.9±0.6a	22.0±11.9b	15.8±8.0a
	2 400~2 600(III)	193.6±99.5a	104.3±37.3a	5.7±1.3a	0.6±0.3a	34.3±13.7ab	18.8±6.5a
	2 600~2 800(IV)	182.5±61.6a	93.1±35.5a	7.7±2.8a	0.5±0.2a	27.2±15.5ab	12.2±1.3a

表3 天山羽衣草不同器官养分特征与土壤养分含量特征的相关系数

Table 3 The correlation coefficients of nutrient concentrations between soil and plant organs of *A. tianschanica*

项目	地上部	根系
C	0.179	0.205
N	0.157	0.159
P	0.307	0.307
K	-0.011	-0.021
C : N	-0.025	0.005
C : P	0.220	-0.133
C : K	0.082	0.023
N : P	0.152	-0.168
K : N	0.044	-0.049
K : P	0.081	-0.193

表4 天山羽衣草地上部和根系内稳定性

Table 4 The homeostasis in aboveground androots of *A. tianschanica* in spruce forests on the North slope of Tianshan Mountain

器官	C	N	P	K	C : N	C : P	C : K	N : P	K : N	K : P
地上部	6.4	9.8	5.9	—	40.0	14.9	7.4	50.0	10.9	6.3
根系	9.3	250.0	2.5	—	—	15.6	9.3	4.1	—	2.4

注:表中“—”代表该植物器官的该元素不具内稳定性。

件变差温度降低,植物光合作用减弱,营养物质的积累减少。植物地下部分作为养分库器官,受温度和水分影响较小,因而在不同海拔梯度之间差异不显著^[22]。本研究中天山羽衣草地上部养分含量与根系相比,除N含量以外,均为地上部大于根系,与何亚婷等^[23]的研究结论基本一致。叶片是植物与外界进行物质和能量交流的主要器官,营养元素在地面上部中的分配高。而N含量相反而,可能是由于植物体内的N主要是通过植物的根系从土壤中吸收然后向各器官运输^[24]。

申静霞等^[25]研究表明温度和降水是植物生长的重要生态因子,高温湿润的环境使得土壤有机质

3 结论与讨论

3.1 讨论

3.1.1 C、N、P、K 生化计量特征的变化 刘新圣等^[21]研究表明随海拔升高可引起植物水热配比的变化,进而影响植物的生理过程。本研究中天山羽衣草地上部和根系养分含量与新疆草原植物和中国草地生态系统植物相比,C和N含量降低,K含量升高。天山羽衣草地上部养分含量表现为海拔2 000~2 400 m 区域大于海拔2 400~2 800 m 区域,且养分含量随海拔变化差异显著;根系的养分含量表现为:高海拔区域(2 400~2 800 m)大于低海拔区域(海拔2 000~2 400 m),养分含量随海拔变化差异不显著。低海拔区域,水热条件良好,有利于增加植物体内营养物质的积累;高海拔区域,水热条

积累相对容易;而随海拔升高,水热条件逐渐降低,凋落物养分循环减弱,使得土壤养分含量呈现下降的趋势。但本研究中土壤养分含量随海拔波动性变化,海拔Ⅱ和Ⅳ的养分含量高于海拔Ⅰ和Ⅲ,与聂明鹤等^[26]在小尺度的研究结果一致,可能是样地内物种组成以及地形等其他因素产生一定的影响。

3.1.2 C、N、P、K 生化计量比特征的变化 生化计量比值可用于揭示植物的营养状况和区域生境的养分供给能力^[27]。在水热条件良好的低海拔区域,植物生长发育快,养分利用效率较高。本研究中天山羽衣草地上部C:N和K:N在不同海拔之间差异不显著,C:P、C:K、N:P、K:P呈低

海拔区域大于高海拔区域的规律。根系 C:N、C:K 和 K:N 在不同海拔梯度之间差异均不显著,而 C:P、N:P 和 K:P 在海拔 2 400~2 600 m 为最大值,反映了 P 对于根系生长的重要性。本研究中天山羽衣草地上部的 N:P 变化为 5.1~7.3,地上部分生长受到 N 限制;根系的 N:P 变化为 13.4~21.5,根系生长主要受到 P 限制。与刘万德等^[28]研究结论一致,植物生长初期受 N 限制,而在演替后期主要受 P 限制。

土壤元素化学计量比反映了土壤释放矿化养分的能力^[29]。本研究中虽然不同海拔土壤 C:N、C:P、C:K、N:P 和 K:P 差异不显著,但仍表现为低海拔区域大于高海拔区域的趋势。因此,认为低海拔良好的水热配比条件有利于土壤养分的矿化。土壤 N:P 的变化为 0.5~0.9,与其他土壤 N:P 研究相比该比值偏小^[30-31],造成这一结果的原因可能来自气候与植物的双重影响。已有的针对中国不同气候土壤 C、N、P 生态化学计量特征的研究表明,N:P 在不同气候区的变异较大^[32-33],本研究区域土壤 N:P 具有地域特点。此外,因植物与土壤的反馈作用,植物会影响土壤 N 和 P 的贮存与矿化。

3.1.3 天山羽衣草内稳定性特征

土壤为植物提供了生长必需的养分,植物体内养分特征与土壤养分具有一定相关性。但在本研究中,天山羽衣草地上部和根系养分特征均与对应土壤养分特征相关性不显著。

天山羽衣草 C、N、P、K 元素计量比的内稳定性高于元素本身,说明植物在生长过程中按一定比例调控自身营养元素,C:N(稳态型)内稳定性高于 P(弱稳态型)。李贵才等^[34]研究表明,植物 N 含量比 P 含量具有更高的自我调控系数,表现出较强的化学内稳定性。同时,天山羽衣草地上部与根系化学元素内稳定性相比,根系 C、N、C:P 和 C:K 内稳定性更高。石贤萌等^[35]对哀牢山中山湿性常绿阔叶林 2 种优势幼苗研究表明,幼苗根和茎的 N 内稳定性比叶片更高;贡璐等^[6]在对塔里木河绿洲棉花的研究中发现,苗期根系 N、P 元素内稳定性均比叶片高。

3.2 结论

天山北坡云杉林下天山羽衣草地上部和根系 C、N、P、K 含量分别为 30.77%~39.17%、0.87%~1.13%、0.16%~0.20%、3.13%~3.47% 和 33.37%~34.85%、1.76%~1.78%、0.09%~0.17%、1.46%~1.80%。

天山羽衣草地上部养分含量低海拔区域(I 和 II)高于高海拔区域(III 和 IV);根系养分含量高海拔区域(III 和 IV)高于低海拔区域(I 和 II);土壤养分

含量海拔 II、IV 高于海拔 I、III。

天山羽衣草地上部 C:P、C:K、N:P、K:P 计量比低海拔区域均大于高海拔区域;根系 C:N、C:K 和 K:N 计量比在不同海拔区域之间差异均不显著,C:P、N:P 和 K:P 均随海拔升高先增大后减小;不同海拔区域间土壤元素计量比差异不显著。

天山羽衣草地上部 N:P 计量比为 5.1~7.3,本研究认为 N 元素为天山羽衣草地上部生长限制元素;根系 N:P 计量比为 13.4~21.5,P 元素为天山羽衣草根系生长的限制元素。

天山北坡云杉林下优势草本植物天山羽衣草 C、N、P、K 计量比的内稳定性高于元素本身;C、N(稳态型)内稳定性高于 P(弱稳态型)。

综上所述,天山羽衣草地上部和根系养分含量及其化学计量比内稳定性存在一定变化规律,但与温度和降水等环境因子的定量关系如何仍有待进一步研究。

参考文献:

- 王雪梅,闫帮国,赵广,等.云南元谋不同海拔土壤微生物对车桑子碳、氮、磷化学计量特征及土壤特性的影响[J].植物生态学报,2017,41:311-324.
WANG X M, YAN B G, ZHAO G, et al. Effects of microorganism on carbon, nitrogen and phosphorus of *Dodonaea viscosa* and the soils from different elevations in Yuanmou, Yunnan, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2017, 41: 311-324. (in Chinese)
- 李鸿博,许云雷,余志祥,等.金沙江干热河谷典型植物叶片 C、N、P 生态化学计量特征研究[J].西北林学院学报,2021,36(3):10-16.
LI H B, XU Y L, YU Z X, et al. Eco-stoichiometric characteristics of C, N and P in the leaves of typical plant in dry-hot valley of Jinsha River[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(3):10-16. (in Chinese)
- 姬明飞,姚航航,张晓玮.宝天曼自然保护区两种优势藓类植物 C、N、P 生态化学计量特征研究[J].广西植物,2017,37(2):204-210.
JI M F, YAO H H, ZHANG X W. C, N and P ecological stoichiometry of two bryophyte plants in Baotianman Nature Reserve [J]. Guihaia, 2017, 37(2):204-210. (in Chinese)
- 饶丽仙,沈艳,聂明鹤.宁夏典型草原不同退耕年限草地植物土壤生态化学计量特征[J].草业学报,2017,26(4):43-52.
RAO L X, SHEN Y, NIE M H. Effect of grassland restoration duration on plant-soil ecological stoichiometry characteristics in a typical steppe [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26 (4): 43-52. (in Chinese)
- 何琴飞,申文辉,彭玉华,等.钦州湾红树林土壤肥力及其 C、N、P、K 化学计量特征[J].西北林学院学报,2017,32(6):119-124.
HE Q F, SHEN W H, PENG Y H, et al. Soil fertility and C, N, P, K stoichiometry of red soil in Qinzhou Bay, Guangxi [J]. Northwest Forestry University Journal, 2017, 32(6):119-124. (in Chinese)

- N, P, K ecological stoichiometry of mangroves in Qinzhou Bay, Guangxi[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(6):119-124. (in Chinese)
- [6] 贡璐,李红林,刘雨桐,等.N,P施肥对塔里木河上游绿洲棉花C,N,P生态化学计量特征的影响[J].生态学报,2017,37(22):318-326.
- GONG L, LI H L, LIU Y T, et al. Effects of nitrogen and phosphorus fertilizers on carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of oasis cotton in the upper reaching of Tarim River, Xinjiang, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(22): 318-326. (in Chinese)
- [7] 曾昭霞,王克林,刘孝利,等.桂西北喀斯特区原生林与次生林鲜叶和凋落叶化学计量特征[J].生态学报,2016,36(7):1907-1914.
- ZENG Z X, WANG K L, LIU X L, et al. Stoichiometric characteristics of live fresh leaves and leaf litter of typical plant communities in a karst region of Northwestern Guangxi[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(7):1907-1914. (in Chinese)
- [8] 吴统贵,陈步峰,肖以华,等.珠江三角洲3种典型森林类型乔木叶片生态化学计量学[J].植物生态学报,2010,34(1):58-63.
- WU T G, CHEN B F, XIAO Y H, et al. Leaf stoichiometry of trees in three forest types in Pearl River Delta, South China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(1):58-63. (in Chinese)
- [9] 海旭莹,董凌勃,汪晓珍,等.黄土高原退耕还草地C,N,P生态化学计量特征对植物多样性的影响[J].生态学报,2020,40(23):8570-8581.
- HAI X Y, DONG L B, WANG X Z, et al. Effects of carbon, nitrogen, and phosphorus ecological stoichiometry characteristics on plant diversity since returning farmland to grassland on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8570-8581. (in Chinese)
- [10] 樊后保,李燕燕,张义,等.马尾松纯林及其混交林的植被养分含量[J].福建林学院学报,2004(4):289-293.
- FAN H B, LI Y Y, ZHANG Y, et al. Nutrient concentrations of vegetation and forest floor in pure *Pinus massoniana* stand and its mixed forest[J]. Journal of Fujian College of Forestry, 2004(4):289-293. (in Chinese)
- [11] 马任甜,方瑛,安韶山,等.黑岱沟露天煤矿优势植物叶片及枯落物生态化学计量特征[J].土壤学报,2016(4):1003-1014.
- MA R T, FANG Y, AN S S, et al. Ecological stoichiometric characteristics of leaves and litter of plants dominant in Heid-aigou opencast coal Mining area[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016(4):1003-1014. (in Chinese)
- [12] 金晓明,于良斌,张颖琪,等.群落演替对呼伦贝尔草地两种优势植物繁殖分配及生态化学计量的影响[J].应用生态学报,2020,31(3):787-793.
- JIN X M, YU L B, ZHANG Y Q, et al. Effects of community succession on plant reproductive allocation and ecological stoichiometry for two dominant species in the Hulunbuir grassland, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31 (3):787-793. (in Chinese)
- [13] 李玉霖,毛伟,赵学勇,等.北方典型荒漠及荒漠化地区植物叶片氮磷化学计量特征研究[J].环境科学,2010,31(8):1716-1725.
- LI Y L, MAO W, ZHAO X Y, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry in typical desert and desertified regions, North China[J]. Environmental Science, 2010, 31 (8): 1716-1725. (in Chinese)
- [14] 刘洋,曾全超,安韶山,等.黄土丘陵区草本植物叶片与枯落物生态化学计量学特征[J].应用生态学报,2017(6):1793-1800.
- LIU Y, ZENG Q C, AN S S, et al. Ecological stoichiometry of leaf and litter of herbaceous plants in Loess hilly and gully regions, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017 (6):1793-1800. (in Chinese)
- [15] 邹扬庆,张锐,罗红霞,等.重庆中梁山石漠化植被恢复区植被群落演替研究[J].西南大学学报:自然科学版,2015,37(12):47-52.
- ZOU Y Q, ZHANG R, LUO H X, et al. A study of vegetation community succession in the rocky desertification vegetation recovery area in the Zhongliang Mountain of Chongqing[J]. Journal of Southwest University: Natural Science, 2015, 37 (12):47-52. (in Chinese)
- [16] 陈丝露,赵敏,李贤伟,等.柏木低效林不同改造模式优势草本植物多样性及其生态位[J].生态学报,38(1):143-155.
- CHEN S L, ZHAO M, LI X W, et al. Study on plant diversity and niche characteristics of dominant herbaceous populations under different reconstruction patterns in low efficiency stands of *Cupressus funebris* [J]. Acta Ecologica Sinica, 38 (1):143-155. (in Chinese)
- [17] 于浩然,郭东罡.灵空山松栎混交林下草本植物多样性动态分析[J].山西农业科学,2019,47(9):1603-1608.
- YU H R, GUO D G. Dynamics analysis of herbaceous plant diversity under pine-oak mixed forest in Lingkong Mountain [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2019, 47 (9): 1603-160. (in Chinese)
- [18] 张潇月,鱼舜尧,李婷婷,等.金马河温江段河岸带不同生境下草本植物多样性和植物区系与土壤环境因子的关系[J].应用与环境生物学报,2019,25(4):838-844.
- ZHANG X Y, YU S Y, LI T T, et al. Relationship between species diversity, flora and soil environmental factors of the herb community in different habitats in the Wenjiang section of the Jinma River[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2019, 25(4):838-844. (in Chinese)
- [19] Y/T 1270—1999 林业行业标准.森林植物与森林枯枝落叶层全硅、铁、铝、钙、镁、钾、钠、磷、硫、锰、铜、锌的测定[S].
- [20] 陈奶寿,张秋芳,陈坦,等.退化红壤恢复过程中芒萁的N,P化学计量特征[J].林业科学研究,2016(5):735-742.
- CHEN N S, ZHANG Q F, CHEN T, et al. Stoichiometric characteristics of nitrogen and phosphorus in *Dicranopteris dichotoma* during ecosystem restoration of eroded red-soil [J]. Forest Research, 2016(5):735-742. (in Chinese)
- [21] 刘新圣,张林,孔高强,等.藏东南色季拉山急尖长苞冷杉林线地带地上生物量随海拔的变化特征[J].山地学报,2011,29 (3):362-368.
- LIU X S, ZHANG L, KONG G Q, et al. Altitudinal variation in aboveground biomass of *Abies georgei* var. *smithii* at timberline of the Sergyemla Mountain, Southeast Tibet[J]. Jour-

- nal of Mountain Science, 2011, 29(3): 362-368. (in Chinese)
- [22] 施征,白登忠,雷静品,等.高山植物对其环境的生理生态适应性研究进展[J].西北植物学报,2011(8):1711-1718.
- SHI Z, BAI D Z, LEI J P, et al. Advance on physioecological adaptation of alpine plants to mountainous environment[J]. *Acta Botanica Boreali Occidentalia Sinica*, 2011(8): 1711-1718. (in Chinese)
- [23] 何亚婷,董云社,齐玉春,等.草地生态系统土壤微生物量及其影响因子研究进展[J].地理科学进展,2010,29(11):1350-1359.
- HE Y T, DONG Y S, QI Y C, et al. Advances in researches on soil microbial biomass of grassland ecosystems and its influencing factors[J]. *Progress in Geography*, 2010, 29(11): 1350-1359. (in Chinese)
- [24] 何亚婷,刘文治,党高弟,等.秦岭亚高山草甸30种草本植物的碳、氮分布研究[J].草业科学,2008,25(10):1-5.
- HE Y T, LIU W Z, DANG G D, et al. Study on content of C and N contents of 30 plant species in subalpine meadow of Qinling Mountains[J]. *Pratacultural Science*, 2008, 25(10): 1-5. (in Chinese)
- [25] 申静霞,李迈和,于飞海,等.川西云杉幼苗非结构性碳水化合物对土壤温度和水分变化的响应[J].生态学报,2021,41(2):503-512.
- SHEN J X, LI M H, YU F H, et al. Response of non-structural *Picea balfouriana* seedling carbohydrates to soil temperature and moisture[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41 (2): 503-512. (in Chinese)
- [26] 聂明鹤,沈艳,饶丽仙.宁夏典型草原区退耕草地群落演替序列与环境解释[J].草业学报,2018,27(8):11-20.
- NIU M H, SHEN Y, RAO L X. Quantitative classification and environmental interpretation of plant communities on the Ningxia typical steppe after 1-21 years of restoration[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(8):11-20. (in Chinese)
- [27] 郑兴蕊,宋娅丽,王克勤,等.滇中常绿阔叶林凋落物养分释放及生态化学计量特征对模拟N沉降的响应[J].应用生态学报,2021,32(1):23-30.
- ZHENG X R, SONG Y L, WANG K Q, et al. Response of nutrient release and ecological stoichiometry of litter to simulated nitrogen deposition in evergreen broad-leaved forest in central Yunnan, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(1):23-30. (in Chinese)
- [28] 刘万德,苏建荣,李帅锋,等.云南普洱季风常绿阔叶林演替系列植物和土壤C、N、P化学计量特征[J].生态学报,2010(23):6581-6590.
- LIU W D, SU J R, LI S F, et al. Stoichiometry study of C, N and P in plant and soil at different successional stages of monsoon evergreen broad-leaved forest in Puer, Yunnan Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010(23): 6581-6590. (in Chinese)
- [29] 谭海霞,金照光,孙富强,等.滦河口湿地植物-土壤生态化学计量相关性研究[J].水土保持研究,2019,26(2):68-73.
- TAN H X, JIN Z G, SUN F Q, et al. Correlation between the stoichiometric characteristics of plants and soils in Luanhe estuary wetland[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(2): 68-73. (in Chinese)
- [30] 牛玉斌,余海龙,王攀,等.氮磷添加对荒漠草原植物群落多样性和土壤C:N:P生态化学计量特征的影响[J].生态学报,2019,39(22):266-275.
- NIU Y B, YU H L, WANG P, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on plant community diversity and soil C : N : P ecological stoichiometry in a desert steppe of China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39 (22): 266-275. (in Chinese)
- [31] 王攀,朱湾湾,牛玉斌,等.氮添加对荒漠草原植物群落组成与微生物生物量生态化学计量特征的影响[J].生态学报,2019,39(5):427-436.
- WANG P, ZHU W W, NIU Y B, et al. Effects of nitrogen addition on plant community composition and microbial biomass ecological stoichiometry in a desert steppe in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(5):427-436. (in Chinese)
- [32] 黄菊莹,余海龙,刘吉利,等.控雨对荒漠草原植物、微生物和土壤C、N、P化学计量特征的影响[J].生态学报,2018,38(15):96-107.
- HUANG J Y, YU H L, LIU J L, et al. Effects of precipitation levels on the C : N : P stoichiometry in plants, microbes and soils in a desert steppe in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(15):96-107. (in Chinese)
- [33] 杨布朗,胡兴宜,彭守亚,等.栾树柏木混交种植模式对土壤转化酶活性和碳氮含量的影响[J].森林工程,2021,37(3):12-20.
- YANG B L, HU X Y, PENG S Y, et al. Effects of different mixed planting model of Koelreuteria paniculata and Cupressus funebris on soil invertase activity, carbon and nitrogen content[J]. *Forest Engineering*, 2021, 37(3):12-20. (in Chinese)
- [34] 李贵才,韩兴国,黄建辉,等.哀牢山中山湿性常绿阔叶林不同干扰强度下土壤无机氮的变化[J].应用生态学报,2003,14(8):1251-1256.
- LI G C, HAN X G, HUANG J H, et al. Dynamics of soil inorganic nitrogen in middle mountain moist evergreen broadleaf forest under different disturbance intensities in Ailao Mountain [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14 (8): 1251-1256. (in Chinese)
- [35] 石贤萌,杞金华,宋亮,等.哀牢山中山湿性常绿阔叶林两种优势幼苗C、N、P化学计量特征及其对N沉降增加的响应[J].植物生态学报,2015,39(10):962-970.
- SHI X M, QI J H, SONG L, et al. C, N and P stoichiometry of two dominant seedlings and their responses to nitrogen additions in the montane moist evergreen broad-leaved forest in Ailao Mountain, Yunnan[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(10):962-970. (in Chinese)