

准噶尔西部山地新疆野苹果 叶片化学计量特征及其影响因子分析

高雯萱, 张 静, 周晓兵^①, 陶 冶^①

(中国科学院新疆生态与地理研究所 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 以位于准噶尔西部山地的额敏县、托里县和裕民县 16 个样方 84 株新疆野苹果 [*Malus sieversii* (Ledeb.) Roem.] 为研究对象, 对叶片的 C、N、P、K 含量及化学计量比在不同年份、县、放牧强度和枯枝率间的差异进行比较, 并对 27 个环境因子和 6 个个体生长指标与上述叶片化学计量指标的相关性进行分析。结果表明: 在 2017 年, 新疆野苹果叶片 C、N 和 K 含量分别为 462.77、18.69 和 14.95 mg · g⁻¹, 显著 ($P < 0.05$) 高于 2016 年; C/P 比、N/P 比和 N/K 比分别为 325.33、12.99 和 1.37, 也显著高于 2016 年; 但 C/N 比和 P/K 比分别为 26.15 和 0.11, 显著低于 2016 年。除 C 含量外, 其余 9 个化学计量指标在 3 个县间差异显著。重度放牧下叶片 K 含量显著高于其余放牧强度, 而 C/K 比和 P/K 比显著低于其余放牧强度; 中度放牧下叶片 N 含量和 N/P 比显著低于其余放牧强度, 而 C/N 比显著高于其余放牧强度。低枯枝率下叶片 C 含量、N 含量、C/P 比、N/P 比和 N/K 比显著高于其余枯枝率, 而高枯枝率下叶片 P 含量和 P/K 比显著高于其余枯枝率。相关性分析结果表明: 经度、放牧强度、年均降水量以及土壤的全氮含量 (N_s)、全钾含量 (K_s)、速效氮含量 (AN_s) 和 AN_s/AK_s 比与多数叶片化学计量指标显著或极显著 ($P < 0.01$) 相关, 说明这些因子是影响新疆野苹果叶片化学计量特征的主要环境因子。总体来看, 个体生长指标与叶片化学计量指标的相关性较高, 尤其是投影盖度、病虫害程度和枯枝率。结果显示: 准噶尔西部山地新疆野苹果叶片化学计量特征在不同年份、县、放牧程度和枯枝率间差异明显。该区域新疆野苹果生长主要受 N 限制, 应采取适度放牧、加强病虫害防治及增施氮肥等措施, 促进植株生长、缓解养分限制。

关键词: 新疆野苹果; 叶片化学计量指标; 环境因子; 个体生长指标; 相关性分析

中图分类号: Q946.91; Q948.11 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2020)05-0048-10

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2020.05.06

Analyses on leaf stoichiometric characteristics and their influencing factors of *Malus sieversii* in mountainous area of west Junggar Basin GAO Wenxuan, ZHANG Jing, ZHOU Xiaobing^①, TAO Ye^① (State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2020, 29(5): 48-57

Abstract: Taking 84 plants of *Malus sieversii* (Ledeb.) Roem. from 16 plots in Emin County, Toli County, and Yumin County in mountainous area of west Junggar Basin as research objects, differences in C, N, P, and K contents and their stoichiometric ratios in leaf among different years, counties, grazing intensities, and dead branch rates were compared, and correlations of 27 environmental factors and 6 individual growth indexes with above leaf stoichiometric indexes were analyzed. The results show that in 2017, C, N, and K contents in leaf of *M. sieversii* are 462.77, 18.69, and 14.95 mg · g⁻¹, respectively, and significantly ($P < 0.05$) higher than those in 2016; C/P ratio, N/P ratio, and N/K ratio are 325.33, 12.99, and 1.37, respectively, and also significantly higher than those in 2016; but C/N ratio and P/K

收稿日期: 2019-10-18

基金项目: 支持“率先行动”中国博士后科学基金会与中国科学院联合资助优秀博士后项目(2016LH0049); 中国博士后科学基金面上项目(2016M602912); 国家重点研发计划项目(2016YFC0501502); 新疆维吾尔自治区天山创新研究团队项目(2018D14009)

作者简介: 高雯萱(1997—), 女, 安徽宁国人, 硕士研究生, 主要从事植物生态学研究。

^①通信作者 E-mail: zhouxb@ms.xjb.ac.cn; taoye@ms.xjb.ac.cn

ratio are 26.15 and 0.11, respectively, and significantly lower than those in 2016. Except for C content, other 9 stoichiometric indexes among 3 counties are significantly different. Under heavy grazing, K content in leaf is significantly higher than that under other grazing intensities, while C/K ratio and P/K ratio are significantly lower than those under other grazing intensities; under moderate grazing, N content and N/P ratio in leaf are significantly lower than those under other grazing intensities, while C/N ratio is significantly higher than those under other grazing intensities. C content, N content, C/P ratio, N/P ratio, and N/K ratio in leaf under low dead branch rate are significantly higher than those under other dead branch rates, while P content and P/K ratio in leaf under high dead branch rate are significantly higher than those under other dead branch rates. The correlation analysis result shows that longitude, grazing intensity, annual mean precipitation, and total nitrogen content (N_s), total potassium content (K_s), available nitrogen content (AN_s) and AN_s/AK_s ratio of soil are significantly or extremely significantly ($P < 0.01$) correlated with most leaf stoichiometric indexes, indicating that these factors are the major environmental factors affecting leaf stoichiometric characteristics of *M. sieversii*. Overall, individual growth indexes are highly correlated with leaf stoichiometric indexes, especially projective coverage, disease and insect pest degree, and dead branch rate. It is suggested that leaf stoichiometric characteristics of *M. sieversii* in mountainous area of west Junggar Basin are evidently different among different years, counties, grazing intensities, and dead branch rates. Growth of *M. sieversii* in this area is mainly limited by N, and measures of moderate grazing, strengthening of disease and insect pest control, and increasing nitrogen fertilizer application, etc. should be adopted to promote plant growth and relief nutrient limitation.

Key words: *Malus sieversii* (Ledeb.) Roem.; leaf stoichiometric index; environmental factor; individual growth index; correlation analysis

新疆野苹果 [*Malus sieversii* (Ledeb.) Roem.] 隶属于蔷薇科 (Rosaceae) 苹果属 (*Malus* Mill.), 为第三纪孑遗植物。该种既是中国珍贵的野生果树资源, 也是世界苹果基因库的重要组成部分, 主要分布在哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦和中国新疆天山及其附近地区^[1]。研究证实, 新疆野苹果是世界栽培苹果的起源中心^[2]。然而, 由于农田开发、过度放牧及人为砍伐等人类活动的干扰程度越来越大, 再加上苹果小吉丁虫 (*Agrilus mali* Matsumura) 的危害, 新疆野苹果的分布面积急剧减少, 已成为渐危种^[3], 因此, 急需加快新疆野苹果退化机制和生态保育方面的研究。

碳 (C)、氮 (N)、磷 (P)、钾 (K) 是植物生长必不可少的四大营养元素, 其在植物体内的含量及可利用性对植物的生长和生产力有重要影响。生态化学计量学 (ecological stoichiometry) 主要研究生物系统能量平衡以及多种化学元素的平衡和相互关系, 是研究多种化学元素平衡对生态交互作用影响的重要理论基础^[4-6]。植物叶片的 N 含量、P 含量和 N/P 比是研究植物生长过程中养分限制的重要指标^[7-8], 可通过植物体内各化学元素的含量及比值的阈值来判断植物的养分限制类型^[8-9]。环境变化和人类活动对生态系统的化学元素循环也有较大影响^[4, 10-11]。可见, 植物的化学计量特征及其养分限制状况受到生物因子

和非生物因子的共同调控^[10-12]。相关研究^[4, 11, 13]表明: 植物化学计量特征在大尺度上随着纬度、温度和降水量的变化而改变, 而在小尺度上主要受土壤养分供给能力、土壤理化特性、地形地貌及微环境等因子的影响。此外, 植物化学计量特征还与植物个体生长状况及多种干扰因子密切相关^[14]。

目前, 关于新疆野苹果的研究主要集中在种群年龄结构^[15]、遗传多样性^[16-17]、光合特性^[18]及病虫害防治^[19]等方面, 而关于其叶片养分状况和化学计量指标的变异性及影响因子尚不清楚。为此, 本研究以准噶尔西部山地的新疆野苹果为研究对象, 对叶片的 C、N、P 和 K 含量及化学计量比在不同年份、县、放牧强度和枯枝率间的差异进行比较, 并对其与 27 个环境因子和 6 个个体生长指标进行相关性分析, 以期揭示新疆野苹果叶片化学计量指标在不同分布区、放牧强度、生长状况及年际间的差异和养分限制类型, 探寻影响新疆野苹果叶片化学计量特征的主要因子, 为人工调控新疆野苹果种群更新提供参考依据。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

准噶尔西部山地位于新疆天山以北、准噶尔盆地

西侧,由诸多不连续的低山丘陵组成,大致呈东西走向,主要包括塔额盆地及其周边的低山丘陵区,海拔一般不超过 3 000 m。该区域属于温带内陆干旱、半干旱气候,年均温 6.5 °C,夏季月均温 22 °C 左右,冬季月均温 -9 °C 左右;年降水量 220~380 mm,夏季降水量占全年降水量的 55%;年均太阳总辐射量 5 717 MJ·m⁻²,年日照时数 2 800~3 000 h,无霜期 130~190 d。该区域有风天气较多,单次大风最长可持续 7 d,最高风速 40 m·s⁻¹[20]。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集及处理 分别于 2016 年和 2017 年的 7 月至 8 月初进行野外调查和采样。依据新疆野苹果在额敏县、托里县和裕民县 3 个县内的实际分布

情况,共设置 16 个样方,样方面积均为 30 m×30 m。在每个样方中选取个体大小中等、树冠不重叠的新疆野苹果植株作为样株,共选取 84 株样株。当样方内的新疆野苹果不超过 6 株时,将全部植株作为样株;当样方内的新疆野苹果不超过 12 株时,选择 6 株植株作为样株;当样方内的新疆野苹果超过 12 株时,根据实际植株数适当增加样株数量。供试样方的基本信息及样株数见表 1。

在样株树冠中部东、南、西、北 4 个方向上采集新鲜的成熟叶片,每株约 30 枚叶片,装入信封后带回实验室,置于 70 °C 烘箱内烘干 24 h;使用 RS200 盘式震动研磨仪(德国 Retsch 公司)将干燥叶片研磨成粉末,待用。

表 1 准噶尔西部山地 16 个新疆野苹果样方的基本信息及样株数

Table 1 Basic information and sample number of 16 plots of *Malus sieversii* (Ledeb.) Roem. in mountainous area of west Junggar Basin

样方 ¹⁾ Plot ¹⁾	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔/m Altitude	坡度/(°) Slope	坡向/(°) Slope aspect	坡位 Slope position	年均温/°C Annual mean temperature		年均降水量/mm Annual mean precipitation		放牧强度 ²⁾ Grazing intensity ²⁾		样株数 Sample number
							2016	2017	2016	2017	2016	2017	
P1	E83°59'09"	N46°21'54"	1 204.5	10	205	上部 Upper	3.4	3.2	443.4	327.0	HG	BG	2
P2	E83°59'32"	N46°21'42"	1 200.2	12	321	顶部 Top	3.4	3.5	442.4	326.2	HG	BG	7
P3	E83°59'12"	N46°21'35"	1 202.3	14	4	中部 Middle	3.4	3.8	442.7	326.5	HG	BG	6
P4	E83°55'39"	N46°23'23"	853.2	15	336	下部 Lower	5.8	5.3	374.1	275.9	LG	LG	3
P5	E83°57'01"	N46°23'38"	945.8	20	185	底部 Bottom	5.1	4.9	392.5	289.5	LG	LG	4
P6	E83°59'31"	N46°22'20"	1 291.6	12	26	顶部 Top	2.7	3.1	462.1	340.8	HG	BG	5
P7	E83°59'31"	N46°22'56"	1 293.9	9	263	顶部 Top	2.7	2.9	462.5	341.1	HG	BG	4
P8	E83°59'13"	N46°22'06"	1 217.5	17	231	下部 Lower	3.3	3.0	446.6	329.4	HG	BG	5
P9	E83°57'45"	N46°23'05"	987.9	6	18	底部 Bottom	4.9	5.0	400.6	295.4	MG	MG	5
P10	E83°32'09"	N46°09'03"	921.2	25	276	下部 Lower	5.9	5.8	384.5	283.6	MG	LG	7
P11	E83°32'21"	N46°09'06"	900.1	12	176	底部 Bottom	6.1	6.3	380.1	280.3	MG	HG	8
P12	E83°32'46"	N46°09'07"	876.6	9	129	底部 Bottom	6.2	5.9	375.1	276.6	MG	HG	12
P13	E83°32'57"	N46°09'12"	863.2	10	26	中部 Middle	6.3	6.2	372.2	274.5	HG	HG	8
P14	E82°45'02"	N46°03'41"	1 074.4	19	304	底部 Bottom	5.3	5.7	435.7	321.3	LG	MG	3
P15	E82°45'31"	N46°03'15"	1 076.9	23	200	下部 Lower	5.3	5.5	436.2	321.7	LG	MG	2
P16	E82°45'40"	N46°03'53"	1 074.2	8	260	下部 Lower	5.2	5.1	439.1	323.8	LG	LG	2

¹⁾ P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9: 额敏县 Emin County; P10, P11, P12, P13: 托里县 Toli County; P14, P15, P16: 裕民县 Yumin County.

²⁾ BG: 禁牧 Banning grazing; LG: 轻度放牧 Light grazing; MG: 中度放牧 Moderate grazing; HG: 重度放牧 Heavy grazing.

1.2.2 叶片化学计量指标测定及计算 称取 50 mg 干燥的叶片粉末,采用 Multi N/C 3100 总有机碳/总氮分析仪(德国 Jena 公司)测定 C 和 N 含量;称取 200 mg 干燥的叶片粉末,采用钼锑抗比色法^{[21]268-269}测定 P 含量,采用火焰光度法^{[21]270}测定 K 含量。每个指标均重复测定 3 次,结果取平均值。根据测定的 C、N、P 和 K 含量分别计算 C/N 比、C/P 比、C/K 比、N/P 比、N/K 比和 P/K 比。

1.2.3 个体生长指标调查 使用测高杆(精度 1 cm)测量样株从树干基部到树冠顶部的高度,即株高。使

用皮尺(精度 1 mm)测量样株基部距地面 10 cm 处树干的周长,据此计算树干的直径,即基径。投影盖度根据公式“投影盖度=样株冠幅面积-样株间空隙面积”计算获得,其中,样株冠幅面积=树冠长度×树冠宽度×π,而树冠的长度和宽度使用皮卷尺(精度 1 cm)测量;样株空隙面积采用目测法^[22]估算。病虫害程度根据叶片病斑数、枝条病叶数和整株病叶数进行综合评价,分为 1~10 共 10 个等级,数值越大表示样株受到的病虫害程度越严重。枯枝率(DBR)为单株死亡枝条数占单株枝条总数的比例^[19],根据 DBR

值分成低 (DBR < 25%)、中 (25% ≤ DBR < 50%)、高 (DBR ≥ 50%) 3 个等级; 结果量根据样株的果实大小、数量和植株大小进行综合评价, 分为 0~9 共 10 个等级, 0 表示无果实, 数值越大表示果实越多, 且相同大小样株的单个果实越大、数量越多, 等级越高, 反之则等级越低。

1.2.4 土壤取样方法及理化性质分析 在每个样方的四角和中心位置各采集 1 份 0~10 cm 土层的土样, 采样点距离样株树干 1 m 以上。将同一样方的 5 份土样混合均匀, 经过自然阴干后, 过 18 目筛 (孔径 1 mm), 待用。

采用重铬酸钾外加热法^{[21]25-38}测定有机碳 (C_s) 含量, 采用凯氏定氮法^{[21]39-69}测定全氮 (N_s) 和速效氮 (AN_s) 含量, 采用钼锑抗比色法^{[21]70-98}测定全磷 (P_s) 和速效磷 (AP_s) 含量, 采用火焰光度法^{[21]99-114}测定全钾 (K_s) 和速效钾 (AK_s) 含量, 使用 PHS-3E pH 计 (上海精密科学仪器有限公司) 测定 pH 值, 使用 DDS-307A 电导率仪 (上海精密科学仪器有限公司) 测定电导率。每个指标均重复测定 3 次, 结果取平均值。根据测定的 C_s、N_s、P_s、K_s、AN_s、AP_s 和 AK_s 含量分别计算 C_s/N_s 比、C_s/P_s 比、C_s/K_s 比、N_s/P_s 比、N_s/K_s 比、P_s/K_s 比、AN_s/AP_s 比、AN_s/AK_s 比和 AP_s/AK_s 比。

1.3 统计及分析方法

使用 EXCEL 2013 软件进行常规数据处理, 采用 SPSS 21.0 统计分析软件对相关数据进行 one-way ANOVA 分析、Duncan's 多重比较和相关性分析。在

相关性分析前, 将坡度换算为坡角的正弦值, 采用 TRASP 指数法^[23]将坡向 (0°~360°) 所指方位角转换为 0~1 的数值, 并将坡位按照顶部、上部、中部、下部、底部分别赋值为 1、2、3、4、5。

2 结果和分析

2.1 准噶尔西部山地新疆野苹果叶片化学计量特征差异分析

2.1.1 在不同年份间的差异 2016 年和 2017 年间准噶尔西部山地新疆野苹果叶片化学计量指标的比较结果见表 2。由表 2 可以看出: 除 P 含量及 C/K 比外, 新疆野苹果叶片 C 含量、N 含量、K 含量、C/N 比、C/P 比、N/P 比、N/K 比和 P/K 比在 2016 年和 2017 年间差异显著 (P < 0.05); 并且, 在 2016 年, C 含量、N 含量、K 含量、C/P 比、N/P 比和 N/K 比低于 2017 年, 但 C/N 比和 P/K 比却高于 2017 年。

2.1.2 在不同县间的差异 准噶尔西部山地额敏县、托里县和裕民县间新疆野苹果叶片化学计量指标的比较结果见表 3。由表 3 可以看出: 除 C 含量外, 新疆野苹果叶片其余 9 个化学计量指标在 3 个县间差异显著, 但无明显规律。3 个县中, 额敏县的 N 含量和 N/P 比最低; 托里县的 P 含量和 K 含量最高, 且 K 含量显著高于其余 2 个县, 而 C/P 比、C/K 比、N/K 比和 P/K 比却最低, 且 C/K 比显著低于其余 2 个县; 裕民县的 N 含量、C/P 比、C/K 比、N/P 比和 N/K 比

表 2 2016 年和 2017 年间准噶尔西部山地新疆野苹果叶片化学计量指标的比较 ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

Table 2 Comparison on leaf stoichiometric indexes of *Malus sieversii* (Ledeb.) Roem. in mountainous area of west Junggar Basin between 2016 and 2017 ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

年份 Year	含量/(mg · g ⁻¹) Content				比值 Ratio					
	C	N	P	K	C/N	C/P	C/K	N/P	N/K	P/K
2016	432.55±2.14b	12.49±0.27b	1.49±0.03a	13.19±0.41b	36.05±0.84a	301.69±6.41b	36.02±1.46a	8.67±0.25b	1.05±0.05b	0.12±0.00a
2017	462.77±3.90a	18.69±0.41a	1.45±0.02a	14.95±0.56a	26.15±0.82b	325.33±6.05a	34.54±1.25a	12.99±0.30a	1.37±0.05a	0.11±0.00b

¹⁾ 同列中不同小写字母表示差异显著 (P < 0.05) Different lowercases in the same column indicate the significant (P < 0.05) difference.

表 3 准噶尔西部山地不同县间新疆野苹果叶片化学计量指标的比较 ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

Table 3 Comparison on leaf stoichiometric indexes of *Malus sieversii* (Ledeb.) Roem. among different counties in mountainous area of west Junggar Basin ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

县 County	含量/(mg · g ⁻¹) Content				比值 Ratio					
	C	N	P	K	C/N	C/P	C/K	N/P	N/K	P/K
额敏 Emin	451.64±2.98a	14.67±0.41b	1.46±0.03a	12.50±0.31b	32.83±0.96a	318.75±6.31b	37.91±0.93a	10.28±0.32b	1.23±0.05b	0.12±0.00a
托里 Toli	445.47±4.76a	16.24±0.61ab	1.53±0.03a	16.67±0.63a	30.17±1.14a	296.91±6.37b	30.43±1.75b	10.70±0.40b	1.06±0.06b	0.10±0.01b
裕民 Yumin	435.62±4.42a	18.14±1.03a	1.21±0.04b	10.72±0.73b	24.97±1.34b	364.70±13.31a	43.36±3.39a	14.95±0.64a	1.77±0.13a	0.12±0.01ab

¹⁾ 同列中不同小写字母表示差异显著 (P < 0.05) Different lowercases in the same column indicate the significant (P < 0.05) difference.

最高,且 C/P 比、N/P 比和 N/K 比显著高于其余 2 个县,而 P 含量、K 含量和 C/N 比却最低,且 P 含量和 C/N 比显著低于其余 2 个县。

2.1.3 在不同放牧强度间的差异 不同放牧强度间准噶尔西部山地新疆野苹果叶片化学计量指标的比较结果见表 4。由表 4 可以看出:不同放牧强度下新疆野苹果叶片 C 含量、P 含量、C/P 比和 N/K 比无显著差异。在中度放牧强度下,N 含量和 N/P 比显著低于其余 2 个放牧强度,而 C/N 比却显著高于其余 2 个放牧强度;在重度放牧强度下,K 含量显著高于其余 2 个放牧强度,而 C/K 比和 P/K 比却显著低于其余 2 个放牧强度。

2.1.4 在不同枯枝率间的差异 不同枯枝率间准噶尔西部山地新疆野苹果叶片化学计量指标的比较结果见表 5。由表 5 可以看出:低枯枝率下新疆野苹果叶片 C 含量、N 含量、C/P 比、C/K 比、N/P 比和 N/K 比最高,且 C 含量、N 含量、C/P 比、N/P 比和 N/K 比显著高于其余枯枝率,而 P 含量和 C/N 比最低,且 C/N 比显著低于其余枯枝率;中等枯枝率下 K 含量最高,且显著高于其余枯枝率,而 C/K 比、N/K 比和 P/K 比最低,且 C/K 比显著低于其余枯枝率;高枯枝率下 P 含量、C/N 比和 P/K 比最高,且 P 含量和 P/K 比显著高于其余枯枝率,而 N 含量、K 含量、C/P 比和 N/P 比最低,且 C/P 比显著低于其余枯枝率。

表 4 不同放牧强度间准噶尔西部山地新疆野苹果叶片化学计量指标的比较 ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

Table 4 Comparison on leaf stoichiometric indexes of *Malus sieversii* (Ledeb.) Roem. in mountainous area of west Junggar Basin among different grazing intensities ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

放牧强度 Grazing intensity	含量/(mg·g ⁻¹) Content				比值 Ratio					
	C	N	P	K	C/N	C/P	C/K	N/P	N/K	P/K
轻度 Light	448.89±4.28a	15.42±0.56a	1.45±0.03a	12.36±0.36b	30.73±1.00b	317.74±7.59a	37.79±1.15a	10.83±0.42a	1.28±0.05a	0.12±0.00a
中度 Moderate	440.88±3.70a	13.53±0.62b	1.51±0.04a	13.08±0.65b	34.85±1.45a	301.40±9.34a	37.88±2.68a	9.33±0.57b	1.17±0.10a	0.13±0.01a
重度 Heavy	450.18±4.13a	16.66±0.53a	1.47±0.03a	15.53±0.58a	29.57±1.09b	316.63±6.78a	32.63±1.34b	11.53±0.36a	1.18±0.06a	0.10±0.00b

¹⁾ 同列中不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) difference.

表 5 不同枯枝率间准噶尔西部山地新疆野苹果叶片化学计量指标的比较 ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

Table 5 Comparison on leaf stoichiometric indexes of *Malus sieversii* (Ledeb.) Roem. in mountainous area of west Junggar Basin among different dead branch rates ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

枯枝率 Dead branch rate	含量/(mg·g ⁻¹) Content				比值 Ratio					
	C	N	P	K	C/N	C/P	C/K	N/P	N/K	P/K
低 Low	459.61±4.83a	17.26±0.52a	1.43±0.03b	13.33±0.56b	28.28±0.93b	331.11±7.75a	38.55±1.83a	12.31±0.39a	1.41±0.06a	0.12±0.00b
中 Moderate	436.41±2.77b	14.73±0.53b	1.46±0.03b	15.34±0.54a	32.39±1.15a	305.45±5.91b	31.06±1.11b	10.22±0.38b	1.03±0.05b	0.10±0.00b
高 High	442.61±4.49b	14.48±0.75b	1.64±0.06a	12.93±0.78b	32.40±1.62a	279.74±10.47c	37.06±2.18a	9.06±0.52b	1.20±0.09b	0.14±0.01a

¹⁾ 同列中不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) difference.

2.2 准噶尔西部山地土壤理化性质分析

从准噶尔西部山地 16 个样方土壤的理化性质统计结果(表 6)看,该区域土壤偏酸性(pH 6.53),平均电导率为 222.41 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。该区域土壤的有机碳(C_s)、全氮(N_s)、全磷(P_s)和全钾(K_s)含量平均值分别为 58.42、5.72、0.98 和 69.80 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$;其 C_s/N_s 比、 C_s/P_s 比、 C_s/K_s 比和 N_s/P_s 比平均值均大于 1,分别为 10.14、59.84、1.67 和 5.82,而 N_s/K_s 比和 P_s/K_s 比平均值却明显小于 1,仅分别为 0.15 和 0.03。该区域土壤的速效氮(AN_s)、速效磷(AP_s)和速效钾(AK_s)含量平均值分别为 379.57、18.63 和 611.81 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;其 AN_s/AP_s 比平均值远大于 1,

高达 27.21,而 AN_s/AK_s 比和 AP_s/AK_s 比平均值却明显小于 1,仅分别为 0.65 和 0.03。

从准噶尔西部山地 16 个样方土壤各理化指标的变异系数看,pH 值的变异系数最小(7.6%), P_s 含量的变异系数也较小(17.3%),而电导率、 K_s 含量、 AP_s 含量、 C_s/K_s 比、 N_s/K_s 比、 P_s/K_s 比、 AN_s/AP_s 比、 AN_s/AK_s 比和 AP_s/AK_s 比的变异系数较大,均在 50% 以上。

2.3 准噶尔西部山地环境因子与新疆野苹果叶片化学计量指标的相关性分析

准噶尔西部山地环境因子与新疆野苹果叶片化学计量指标的相关性分析结果见表 7。由表 7 可

见:坡向以及土壤的 pH 值、全磷含量(P_s)、速效钾含量(AK_s)和 AP_s/AK_s 比与新疆野苹果 10 个叶片化学计量指标不显著相关,坡度和坡位以及土壤的速效磷含量(AP_s)、电导率和 C_s/P_s 比仅与新疆野苹果 1 或 2 个叶片化学计量指标显著 ($P < 0.05$) 相关,说明这 10 个环境因子对新疆野苹果叶片化学计量特征的影响较小;经度,年均降水量,放牧强度以及土壤的全氮含量(N_s)、全钾含量(K_s)、速效氮含量

(AN_s) 和 AN_s/AK_s 比与新疆野苹果 5 或 6 个叶片化学计量指标显著或极显著 ($P < 0.01$) 相关,说明这 7 个环境因子对新疆野苹果叶片化学计量特征的影响较大;其余 10 个环境因子与新疆野苹果 3 或 4 个叶片化学计量指标显著或极显著相关,说明这些环境因子对新疆野苹果叶片化学计量特征有一定的影响。值得注意的是,新疆野苹果叶片的 C、N、P 和 K 含量以及 C/N 比、N/P 比和 N/K 比分别与 6、12、

表 6 准噶尔西部山地土壤的理化性质¹⁾

Table 6 Physicochemical properties of soil in mountainous area of west Junggar Basin¹⁾

参数 Parameter	pH	EC	含量 Content						
			C_s	N_s	P_s	K_s	AN_s	AP_s	AK_s
最小值 Minimum	5.82	79.90	12.37	2.63	0.73	19.28	68.63	4.72	182.00
最大值 Maximum	7.80	616.00	106.33	8.86	1.39	144.93	669.39	53.74	936.00
平均值 Mean	6.53	222.41	58.42	5.72	0.98	69.80	379.57	18.63	611.81
标准误 Standard error	0.09	20.41	4.21	0.35	0.03	8.54	33.17	1.97	34.29
变异系数/% Coefficient of variation	7.6	51.9	40.7	34.2	17.3	69.2	49.4	59.7	31.7

参数 Parameter	比值 Ratio								
	C_s/N_s	C_s/P_s	C_s/K_s	N_s/P_s	N_s/K_s	P_s/K_s	AN_s/AP_s	AN_s/AK_s	AP_s/AK_s
最小值 Minimum	4.10	12.10	0.19	2.89	0.02	0.01	2.69	0.13	0.01
最大值 Maximum	13.00	100.22	5.52	8.78	0.43	0.06	85.56	1.36	0.08
平均值 Mean	10.14	59.84	1.67	5.82	0.15	0.03	27.21	0.65	0.03
标准误 Standard error	0.39	4.07	0.27	0.31	0.02	0.00	3.83	0.06	0.00
变异系数/% Coefficient of variation	21.7	38.5	91.4	30.0	81.5	71.7	79.6	50.1	60.0

¹⁾ pH: pH 值 pH value; EC: 电导率 Electric conductivity ($\mu S \cdot cm^{-1}$); C_s : 土壤有机碳含量 Organic carbon content in soil ($g \cdot kg^{-1}$); N_s : 土壤全氮含量 Total nitrogen content in soil ($g \cdot kg^{-1}$); P_s : 土壤全磷含量 Total phosphorus content in soil ($g \cdot kg^{-1}$); K_s : 土壤全钾含量 Total potassium content in soil ($g \cdot kg^{-1}$); AN_s : 土壤速效氮含量 Available nitrogen content in soil ($mg \cdot kg^{-1}$); AP_s : 土壤速效磷含量 Available phosphorus content in soil ($mg \cdot kg^{-1}$); AK_s : 土壤速效钾含量 Available potassium content in soil ($mg \cdot kg^{-1}$).

表 7 准噶尔西部山地环境因子与新疆野苹果叶片化学计量指标间的相关性

Table 7 Correlation between environmental factors in mountainous area of west Junggar Basin and leaf stoichiometric indexes of *Malus sieversii* (Ledeb.) Roem.

环境因子 ¹⁾ Environmental factor ¹⁾	与新疆野苹果叶片化学计量指标的相关系数 ²⁾ Correlation coefficient with leaf stoichiometric indexes of <i>Malus sieversii</i> ²⁾									
	C	N	P	K	C/N	C/P	C/K	N/P	N/K	P/K
Lon	0.264	-0.391*	0.449**	0.175	0.469**	-0.330	-0.253	-0.604**	-0.539**	0.051
Lat	0.239	-0.384*	0.271	-0.059	0.438*	-0.166	-0.064	-0.504**	-0.381*	0.154
Alt	0.052	-0.224	-0.116	-0.489**	0.262	0.166	0.384*	-0.117	0.134	0.414*
Slo	0.031	0.077	-0.224	-0.246	-0.080	0.234	0.369*	0.179	0.290	0.163
SA	0.233	-0.054	-0.253	-0.175	0.145	0.339	0.258	0.064	0.114	-0.015
SP	0.049	-0.328	0.099	-0.083	0.362*	-0.038	0.050	-0.331	-0.213	0.181
AMT	-0.124	0.315	-0.018	0.399*	-0.368*	-0.059	-0.274	0.278	0.034	-0.385*
AMP	-0.488**	-0.693**	-0.086	-0.437*	0.573**	-0.060	0.263	-0.531**	-0.217	0.404*
GI	-0.218	-0.098	0.471**	0.487**	0.113	-0.508**	-0.531**	-0.304	-0.419*	-0.204
pH	-0.193	0.169	-0.178	0.128	-0.221	0.044	-0.078	0.238	0.138	-0.210
EC	0.008	-0.240	0.202	0.267	0.282	-0.188	-0.328	-0.350*	-0.443*	-0.189
C_s	0.229	0.025	0.449**	0.451**	0.070	-0.329	-0.349*	-0.219	-0.315	-0.127
N_s	0.064	-0.298	0.490**	0.373	0.359*	-0.420*	-0.323	-0.511**	-0.493**	-0.014
P_s	-0.188	-0.098	0.214	0.092	0.122	-0.224	-0.029	-0.180	-0.107	0.097

续表7 Table 7 (Continued)

环境因子 ¹⁾ Environmental factor ¹⁾	与新疆野苹果叶片化学计量指标的相关系数 ²⁾ Correlation coefficient with leaf stoichiometric indexes of <i>Malus sieversii</i> ²⁾									
	C	N	P	K	C/N	C/P	C/K	N/P	N/K	P/K
K _s	-0.543**	-0.721**	0.045	-0.257	0.579**	-0.213	0.103	-0.626**	-0.360*	0.317
AN _s	-0.129	-0.512**	0.459**	0.214	0.520**	-0.462**	-0.255	-0.679**	-0.561**	0.109
AP _s	0.098	0.405*	0.185	0.300	-0.316	-0.127	-0.166	0.257	0.123	-0.176
AK _s	-0.104	0.050	0.002	0.123	-0.022	-0.102	-0.212	0.021	-0.072	-0.164
C _s /N _s	0.402*	0.505**	0.161	0.318	-0.385*	-0.015	-0.219	0.329	0.113	-0.239
C _s /P _s	0.360	0.082	0.358*	0.408*	0.017	-0.214	-0.303	-0.129	-0.242	-0.151
C _s /K _s	0.469**	0.516**	0.174	0.435*	-0.393*	-0.001	-0.252	0.332	0.069	-0.314
N _s /P _s	0.208	-0.274	0.422*	0.351*	0.336	-0.321	-0.307	-0.463**	-0.467**	-0.051
N _s /K _s	0.475**	0.493**	0.154	0.407*	-0.365*	0.023	-0.222	0.324	0.076	-0.297
P _s /K _s	0.448*	0.711**	0.070	0.311	-0.571**	0.089	-0.154	0.566**	0.310	-0.283
AN _s /AP _s	-0.183	-0.518**	0.262	-0.097	0.441*	-0.305	-0.057	-0.574**	-0.380*	0.247
AN _s /AK _s	-0.119	-0.465**	0.481**	0.048	0.431*	-0.428*	-0.057	-0.615**	-0.402*	0.325
AP _s /AK _s	0.253	0.331	0.056	0.206	-0.259	0.107	0.021	0.265	0.157	-0.146

¹⁾ Lon: 经度 Longitude; Lat: 纬度 Latitude; Alt: 海拔 Altitude; Slo: 坡度 Slope; SA: 坡向 Slope aspect; SP: 坡位 Slope position; AMT: 年均温 Annual mean temperature; AMP: 年均降水量 Annual mean precipitation; GI: 放牧强度 Grazing intensity; pH: 土壤 pH 值 pH value of soil; EC: 土壤电导率 Electric conductivity of soil; C_s: 土壤有机碳含量 Organic carbon content in soil; N_s: 土壤全氮含量 Total nitrogen content in soil; P_s: 土壤全磷含量 Total phosphorus content in soil; K_s: 土壤全钾含量 Total potassium content in soil; AN_s: 土壤速效氮含量 Available nitrogen content in soil; AP_s: 土壤速效磷含量 Available phosphorus content in soil; AK_s: 土壤速效钾含量 Available potassium content in soil.

²⁾ C: C 含量 C content; N: N 含量 N content; P: P 含量 P content; K: K 含量 K content. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

8、9、14、11 和 10 个环境因子显著或极显著相关,而 C/P 比、C/K 比和 P/K 比仅与 3 或 4 个环境因子显著或极显著相关,说明新疆野苹果这 6 个叶片化学计量指标受环境因子影响较大。

2.4 准噶尔西部山地新疆野苹果的个体生长状况及其与叶片化学计量指标的相关性分析

准噶尔西部山地新疆野苹果个体生长状况的统计结果(表 8)表明:准噶尔西部山地的新疆野苹果平均株高 6.89 m,平均基径 0.30 m,投影盖度 51.5%,病虫害程度较轻(平均等级 3.6),枯枝率 29.8%,但结果量较低(平均等级仅 3.2)。

从新疆野苹果各个体生长指标的变异系数看,新疆野苹果株高的变异系数较小(18.3%),其余个体生长指标的变异系数较大(40.5%~99.0%),其中,结果量的变异系数最大。

准噶尔西部山地新疆野苹果个体生长指标与叶片化学计量指标的相关性分析结果见表 9。由表 9 可见:株高与 K 含量呈极显著($P < 0.01$)正相关,与 C/K 比、N/K 比和 P/K 比极显著负相关;基径与 C 含量、C/N 比和 C/P 比极显著正相关,与 N 含量和 K 含量显著负相关;投影盖度与 C 含量、C/N 比、C/P 比、C/K 比和 N/K 比极显著正相关,与 P/K 比显著正相关,与 P 含量和 K 含量极显著负相关;病虫害程度与 N 含量、K 含量和 N/P 比极显著负相关,与 C/P 比显著负相关,与 P/K 比极显著正相关,与 P 含量和 C/N 比显著正相关;枯枝率与 C 含量、N 含量、C/P 比和 N/P 比极显著负相关,与 N/K 比显著负相关,与 P 含量极显著正相关;结果量与 N 含量、N/P 比和 N/K 比极显著正相关,与 C 含量显著正相关,与 C/N 比极显著负相关。

表 8 准噶尔西部山地新疆野苹果的个体生长状况

Table 8 Individual growth status of *Malus sieversii* (Ledeb.) Roem. in mountainous area of west Junggar Basin

参数 Parameter	株高/m Height	基径/m Basal diameter	投影盖度/% Projective coverage	病虫害程度 Disease and insect pest degree	枯枝率/% Dead branch rate	结果量 Fruit quantity
最小值 Minimum	3.90	0.08	10.0	1	5	0
最大值 Maximum	9.80	0.65	90.0	10	90	9
平均值 Mean	6.89	0.30	51.5	3.6	29.8	3.2
标准误 Standard error	0.14	0.01	2.4	0.2	1.4	0.3
变异系数/% Coefficient of variation	18.3	43.2	40.5	64.0	57.8	99.0

表9 准噶尔西部山地新疆野苹果个体生长指标与叶片化学计量指标间的相关性¹⁾Table 9 Correlation between individual growth indexes and leaf stoichiometric indexes of *Malus sieversii* (Ledeb.) Roem. in mountainous area of west Junggar Basin¹⁾

个体生长指标 Individual growth index	相关系数 Correlation coefficient									
	C	N	P	K	C/N	C/P	C/K	N/P	N/K	P/K
株高 Height	-0.135	-0.090	0.014	0.368**	0.073	-0.096	-0.304**	-0.138	-0.360**	-0.282**
基径 Basal diameter	0.250**	-0.166*	-0.148	-0.194*	0.202**	0.234**	0.124	-0.083	-0.060	0.012
投影盖度 Projective coverage	0.340**	-0.190	-0.412**	-0.501**	0.331**	0.505**	0.469**	0.113	0.301**	0.285*
病虫害程度 Disease and insect pest degree	-0.035	-0.221**	0.185*	-0.206**	0.186*	-0.168*	0.113	-0.299**	-0.052	0.255**
枯枝率 Dead branch rate	-0.273**	-0.230**	0.247**	0.004	0.158	-0.326**	-0.073	-0.343**	-0.172*	0.150
结果量 Fruit quantity	0.163*	0.357**	-0.060	0.052	-0.309**	0.089	-0.003	0.368**	0.257**	-0.066

¹⁾ C: C含量 C content; N: N含量 N content; P: P含量 P content; K: K含量 K content. 结果量仅2017年数据,其余个体生长指标为2016年和2017年数据 The datum of fruit quantity is only in 2017, while those of other individual growth indexes are in 2016 and 2017. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

3 讨论和结论

叶是植物对环境变化反应最敏感的器官。叶中的C、N、P含量及比值能够在一定程度上反映植物所处生境的C积累动态及植物受到的养分限制类型^[24]。C主要以碳水化合物形式存在于植物体内,构成植物体的基本骨架,但并不直接参与植物体内的代谢过程,因此,C是植物体内最稳定且含量最高的营养元素。在2016年和2017年,准噶尔西部山地新疆野苹果的叶片C含量分别为432.55和462.77 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,均高于新疆常见荒漠乔木叶片的平均C含量(392.11 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)^[4],说明该区域新疆野苹果的固碳能力强于荒漠木本植物。N和P是影响陆地植物生长的2种重要的限制性营养元素。在2016年和2017年,准噶尔西部山地新疆野苹果的叶片N含量分别为12.49和18.69 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,分别低于和高于国内753种植物的平均N含量(18.60 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)^[25];P含量分别为1.49和1.45 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,均高于国内753种植物的平均P含量(1.21 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$);N/P比分别为8.67和12.99,均低于国内753种植物的N/P比(14.40);并且,2017年的N含量和N/P比显著高于2016年,但P含量与2016年无显著差异,说明2017年新疆野苹果的光合能力强于2016年,这2年间P对新疆野苹果生长的限制作用较小,N对新疆野苹果生长的限制作用较大,且植株在2017年受N限制的程度较2016年明显缓和,符合Reich等^[26]得出的研究结论(即中高纬度土壤对植物生长的限制因子为N)。

植物生长的年际间差异主要归因于不同年份气象因子的差异,尤其是降水量差异^[27]。相关性分析结果表明:年均降水量与准噶尔西部山地新疆野苹果

叶片C含量、N含量和N/P比极显著负相关,与C/N比极显著正相关,说明随着年均降水量升高,准噶尔西部山地新疆野苹果叶片C含量、N含量和N/P比降低,但C/N比升高。气象资料显示:2016年新疆地区的降水量(418.11 mm)为1961年以来最高,2017年的降水量(308.35 mm)较2016年下降26.3%;本研究中,2017年准噶尔西部山地新疆野苹果叶片C含量、N含量和N/P比显著高于2016年,与相关性分析结果相符。这可能是因为降水量增加会加重土壤养分淋溶和流失,降低土壤养分的可利用性,进而影响土壤为植物供应养分;同时,降水还会直接淋溶叶片养分,对植物体造成一定的养分损失^[28]。综上所述,准噶尔西部山地新疆野苹果叶片化学计量特征的年际变化可能与降水量的年际变化存在密切联系。

不同地区的空间差异主要体现在经度、纬度、海拔、坡度、坡向和坡位等地理因子的差异上。经度和纬度主要影响植物的光照情况,并在一定程度上引起水热条件变化,间接影响植物的生长和分布^[29]。相关性分析结果表明:在准噶尔西部山地,经度与新疆野苹果叶片N含量显著负相关,与P含量和C/N比极显著正相关,与N/P比和N/K比极显著负相关;纬度与新疆野苹果的叶片N含量和N/K比显著负相关,与C/N比显著正相关,与N/P比极显著负相关;而海拔、坡度、坡向和坡位与新疆野苹果叶片多数化学计量指标不显著相关,这可能是因为准噶尔西部山地的海拔较低(853.2~1 293.9 m)、坡面平缓($6^\circ \sim 25^\circ$),在很大程度上弱化了地理因子对新疆野苹果的影响。

放牧是一个综合的干扰过程,包括动物采食和践踏等方面,以及由此产生的土壤理化状况的变化^[30]。尽管准噶尔西部山地新疆野苹果群落面积急剧减少

是多个因子综合作用的结果,但过度放牧可能是其中非常重要的一个原因。相关性分析结果表明:放牧强度与新疆野苹果叶片 C 含量和 N 含量不显著负相关,但与 P 含量和 K 含量极显著正相关,与 C/P 比和 C/K 比极显著负相关,与 N/K 比显著负相关,这是因为在放牧过程中,动物采食导致新疆野苹果的衰老组织减少,而其幼嫩组织需要从土壤中吸收更多的 P 和 K 才能满足生长所需^[31-32]。从植物抗性角度看,植物体内的 K 含量提高有利于增强机体的抗性^[33],因此,在放牧强度增大时,新疆野苹果叶片 K 含量升高不但是对放牧强度增大的响应,也是受损组织增强抗性的表现。

土壤中 C、N 和 P 等养分的供养能力对植物叶片化学计量指标有重要影响^[34-37]。相关性分析结果表明:土壤全氮含量(N_s)与新疆野苹果叶片 P 含量极显著正相关,并与多数叶片化学计量比显著或极显著相关;土壤速效氮含量(AN_s)与新疆野苹果叶片 N 含量极显著负相关,与 P 含量极显著正相关,并与多数叶片化学计量比极显著相关。由此可见,提高土壤氮肥(包括全氮和速效氮)供应可促进新疆野苹果叶片中 P 的积累,但却抑制了叶片中 N 的积累。值得注意的是,土壤全钾含量(K_s)与新疆野苹果叶片 N 含量极显著负相关,说明提高土壤的全钾供应会抑制新疆野苹果叶片 N 的积累,这可能是因为新疆野苹果对养分的吸收和利用具有偏向性^[38]。

新疆野苹果个体生长指标与叶片化学计量指标的相关性分析结果表明:病虫害程度和枯枝率与叶片 N 含量极显著负相关,与 P 含量分别显著和极显著正相关,说明病虫害越严重、枯枝率越高,新疆野苹果叶片 N 含量越低、P 含量越高;结果量与叶片 N 含量极显著正相关,说明果实产量越高,新疆野苹果叶片 N 含量越高。根据生长速率理论^[26],果实产量越高,植物的生长速率越快,进而需要更多的 N 用于快速生长。然而,在病虫害严重、枯枝率高的情况下,新疆野苹果的生长速率必然受到很大限制,表现为叶片 N 含量下降。枝条枯死可改变植物对外界能量和养分的获取,进而影响植物的养分状况,造成养分损失^[39]。本研究中,枯枝率与新疆野苹果叶片 C 含量极显著负相关,说明随着枯枝程度增大,新疆野苹果叶片 C 含量明显下降。

本研究结果显示:准噶尔西部山地新疆野苹果的多数叶片化学计量指标在不同年份、县域、放牧程度

及枯枝率间存在明显差异。总体来看,该区域新疆野苹果处于 N 缺乏状态,主要受 N 限制,但在长势较好年份受限制程度有所缓解。经度、放牧强度、年均降水量以及土壤的全氮含量(N_s)、全钾含量(K_s)、速效氮含量(AN_s)和 AN_s/AK_s 比对新疆野苹果叶片化学计量指标的影响较大,投影盖度、病虫害、枯枝率和结果量对新疆野苹果叶片化学计量指标的影响也较大。建议在准噶尔西部山地的新疆野苹果分布区内采取适度放牧、加强病虫害防治及增施氮肥等措施,以促进新疆野苹果生长并缓解其养分限制,利于其种群更新和生态恢复。

致谢:中国科学院新疆生态与地理研究所孙逸翔和陆永兴同学以及石河子大学黄刚老师和陈立同学参与了野外调查,在此深表感谢!

参考文献:

- [1] 苏志豪,李文军,曹秋梅,等.新疆野苹果的种群年龄结构与数量动态[J].干旱区研究,2019,36(5):1153-1160.
- [2] DUAN N, BAI Y, SUN H, et al. Genome re-sequencing reveals the history of apple and supports a two-stage model for fruit enlargement [J]. Nature Communications, 2017, 8: 249.
- [3] 傅立国,金鉴明.中国植物红皮书:稀有濒危植物(第一册)[M].北京:科学出版社,1992:548.
- [4] 何茂松,罗艳,彭庆文,等.新疆67种荒漠植物叶碳氮磷计量特征及其与气候的关系[J].应用生态学报,2019,30(7):2171-2180.
- [5] 贺金生,韩兴国.生态化学计量学:探索从个体到生态系统的统一化理论[J].植物生态学报,2010,34(1):2-6.
- [6] HE J S, FANG J, WANG Z, et al. Stoichiometry and large-scale patterns of leaf carbon and nitrogen in the grassland biomes of China [J]. Oecologia, 2006, 149: 115-122.
- [7] 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):1007-1019.
- [8] WU T, WANG G G, WU Q, et al. Patterns of leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry among *Quercus acutissima* provenances across China [J]. Ecological Complexity, 2014, 17: 32-39.
- [9] TAO Y, WU G, ZHANG Y, et al. Leaf N and P stoichiometry of 57 plant species in the Karamori Mountain Ungulate Nature Reserve, Xinjiang, China [J]. Journal of Arid Land, 2016, 8(6): 935-947.
- [10] 王振南,杨惠敏.植物碳氮磷生态化学计量对非生物因子的响应[J].草业科学,2013,30(6):927-934.
- [11] 智颖颀,刘珮,马慧,等.中国荒漠植物生态化学计量学特征与驱动因素[J].内蒙古大学学报(自然科学版),2017,48(1):97-105.
- [12] GÜSEWELL S. N : P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance [J]. New Phytologist, 2004, 164: 243-266.

- [13] 冯柳俊,陈志强,陈志彪,等.南方红壤侵蚀区不同治理年限样地芒萁和土壤的生态化学计量特征及相关性分析[J].植物资源与环境学报,2019,28(3):58-65.
- [14] 刘超,王洋,王楠,等.陆地生态系统植被氮磷化学计量研究进展[J].植物生态学报,2012,36(11):1205-1216.
- [15] 田润炜,蔡新斌,刘丽燕,等.新疆野苹果种群年龄结构特征与动态分析[J].西北植物学报,2016,36(4):811-817.
- [16] 秦伟,沙红,刘立强,等.新疆野苹果资源遗传多样性SSR分析[J].果树学报,2012,29(2):161-165.
- [17] 李宇秀,张宏祥.死亡植株对新疆野苹果种群遗传多样性的影响[J].干旱区研究,2018,35(1):165-170.
- [18] 毛培利,臧润国,白志强,等.天然林中不同径级新疆野苹果的光合能力[J].干旱区研究,2012,29(5):784-790.
- [19] 崔志军,张彦龙,罗朝辉,等.苹果小吉丁虫(*Agrilus mali* Matsumura)对野苹果林的危害及其评估[J].干旱区研究,2018,35(5):1153-1159.
- [20] 陈丽,李潇然.新疆塔额盆地生物多样性现状及其维护功能研究[J].新疆环境保护,2018,40(4):24-28.
- [21] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2008.
- [22] 常兆丰,段小峰,韩福贵,等.民勤荒漠区主要植物群落的稳定性及生态效应[J].西北植物学报,2014,34(12):2562-2568.
- [23] 田中平,庄丽,李建贵,等.伊犁河谷北坡野果林群落结构及其与环境的关系[J].应用与环境生物学报,2011,17(1):39-45.
- [24] WARDLE D A, WALKER L R, BARDGETT R D. Ecosystem properties and forest decline in contrasting long-term chronosequences[J]. Science, 2004, 305: 509-513.
- [25] HAN W, FANG J, GUO D, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. New Phytologist, 2005, 168: 377-385.
- [26] 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, 2004, 101: 11001-11006.
- [27] 李茂华,金康,李皖彤,等.1982—2015年全球植被变化及其与温度和降水的关系[J].地理科学,2020,40(5):823-832.
- [28] 甘健民,薛敬意,谢寿昌.云南中山湿性常绿阔叶林中降雨对养分淋溶的影响[J].植物生态学报,1996,20(3):279-284.
- [29] 陶冶,张元明,周晓兵.伊犁野果林浅层土壤养分生态化学计量特征及其影响因素[J].应用生态学报,2016,27(7):2239-2248.
- [30] 仁青吉,崔现亮,赵彬彬.放牧对高寒草甸植物群落结构及生产力的影响[J].草业学报,2008,17(6):134-140.
- [31] 许雪贇,曹建军,杨淋,等.放牧与围封对青藏高原草地土壤和植物叶片化学计量学特征的影响[J].生态学杂志,2018,37(5):1349-1355.
- [32] 高巧静,朱文琰,侯将将,等.放牧强度对高寒草甸植物叶片生态化学计量特征的影响[J].中国草地学报,2019,41(3):45-50.
- [33] 刘晓燕,何萍,金继运.钾在植物抗病性中的作用及机理的研究进展[J].植物营养与肥料学报,2006,12(3):445-450.
- [34] 陈新微,杨殿林,刘红梅,等.不同N、P添加水平对黄顶菊叶片化学计量特征的影响[J].农业资源与环境学报,2015,32(2):185-191.
- [35] JING H, ZHOU H, WANG G, et al. Nitrogen addition changes the stoichiometry and growth rate of different organs in *Pinus tabulaeformis* seedlings [J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 1922.
- [36] ZHAO T T, ZHAO N X, GAO Y B. Ecophysiological response in leaves of *Caragana microphylla* to different soil phosphorus levels [J]. Photosynthetica, 2013, 51(2): 245-251.
- [37] HE M, DIJKSTRA F A, ZHANG K, et al. Leaf nitrogen and phosphorus of temperate desert plants in response to climate and soil nutrient availability[J]. Scientific Reports, 2014, 4: 6932.
- [38] 刘子龙,张广军,赵政阳,等.陕西苹果主产区丰产果园土壤养分状况的调查[J].西北林学院学报,2006,21(2):50-53.
- [39] HARTMANN H. Research frontiers for improving our understanding of drought-induced tree and forest mortality[J]. New Phytologist, 2018, 218: 15-28.

(责任编辑:佟金凤)