

贺兰山西坡不同生活型植物叶片化学计量特征及其环境影响因子分析

晁鑫艳^a, 卫玺玺^a, 郑景明^{a,①}, 唐可欣^b, 万 龙^b, 周金星^b

(北京林业大学: a. 生态与自然保护学院, b. 水土保持学院, 北京 100083)

摘要: 在贺兰山西坡海拔 1 848~2 707 m 范围内选取典型植物群落的乔木、灌木和草本优势种, 对不同生活型植物叶片 C、N 和 P 含量及比值进行比较, 并对这些化学计量指标与 14 个环境因子的关系进行分析。结果表明: 总体叶片 C、N 和 P 含量分别为 431.58、15.66 和 1.79 mg · g⁻¹, C : N、C : P 和 N : P 分别为 28.62、254.87 和 9.11。其中, 乔木叶片 C 含量显著 ($P < 0.05$) 高于灌木和草本, 灌木叶片 C : N 显著低于草本和乔木, 其余化学计量指标在 3 个生活型间无显著 ($P > 0.05$) 差异。随年均温升高, 乔木叶片 N : P 显著升高, 灌木叶片 C : P 和 N : P 显著降低, 草本叶片 N 含量和 C : N 分别极显著 ($P < 0.01$) 降低和升高; 随年均降水量升高, 灌木叶片 N : P 显著升高, 草本叶片 N 含量和 C : N 分别极显著升高和降低。土壤含水量和土壤有机碳含量是影响乔木叶片化学计量指标变异的主要环境因子, 其中, 叶片 N 含量与土壤含水量以及叶片 C : P 与土壤有机碳含量在 0.05 水平呈负相关, 叶片 P 含量与 2 个环境因子均在 0.05 水平呈正相关, 而叶片 N : P 与 2 个环境因子分别在 0.05 和 0.01 水平呈负相关。土壤速效磷含量和土壤 pH 值是影响灌木叶片化学计量指标变异的主要环境因子, 但仅叶片 P 含量与土壤速效磷含量在 0.05 水平呈正相关, 叶片 C : P 与土壤速效磷含量则在 0.05 水平呈负相关。土壤含水量、土壤硝态氮含量和土壤容重是影响草本叶片化学计量指标变异的主要环境因子, 其中, 叶片 N 含量与土壤含水量和土壤容重在 0.001 水平分别呈正相关和负相关, 叶片 C : N 与 2 个环境因子在 0.001 水平分别呈负相关和正相关, 叶片 C : P 与 2 个环境因子在 0.05 水平分别呈负相关和正相关, 而叶片 P 含量与环境容重在 0.05 水平呈负相关。综上所述, 贺兰山西坡乔木、灌木和草本植物生长均受 N 限制, 灌木植物生长还受 P 限制。影响不同生活型植物叶片化学计量指标的环境因子不同, 因此, 在保护与恢复贺兰山西坡植被时, 应针对不同生活型植物制定相应的措施。

关键词: 贺兰山西坡; 化学计量指标; 生活型; 环境影响因子; 养分限制; 植被保护

中图分类号: Q946.91; Q948.11 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2023)06-0022-12

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2023.06.03

Leaf stoichiometric characteristics of different life form plants on the western slope of Helan Mountain and analysis on their environmental impact factors CHAO Xinyan^a, WEI Xixi^a, ZHENG Jingming^{a,①}, TANG Kexin^b, WAN Long^b, ZHOU Jinxing^b (Beijing Forestry University: a. College of Ecology and Nature Conservation, b. College of Soil and Water Conservation, Beijing 100083, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2023, 32(6): 22-33

Abstract: Dominant species of arbor, shrub, and herb in typical plant community at elevation range of 1 848–2 707 m on the western slope of Helan Mountain were selected, leaf C, N, and P contents and ratios of different life form plants were compared, and the correlations of these stoichiometric indexes with fourteen environmental factors were analyzed. The results show that the overall leaf C, N, and P contents are 431.58, 15.66, and 1.79 mg · g⁻¹, respectively, and the C : N, C : P, and N : P are 28.62,

收稿日期: 2023-06-20

基金项目: 宁夏重点研发计划项目(2021BEG02005)

作者简介: 晁鑫艳(1999—), 女, 山西晋城人, 硕士研究生, 主要从事植物群落构建研究。

①通信作者 E-mail: zhengjm@bjfu.edu.cn

引用格式: 晁鑫艳, 卫玺玺, 郑景明, 等. 贺兰山西坡不同生活型植物叶片化学计量特征及其环境影响因子分析[J]. 植物资源与环境学报, 2023, 32(6): 22-33.

254.87, and 9.11, respectively. In which, leaf C content of arbor is significantly ($P<0.05$) higher than that of shrub and herb, leaf C : N of shrub is significantly lower than that of herb and arbor, and there is no significant ($P>0.05$) difference in the other stoichiometric indexes among the three life forms. With the increase of mean annual temperature, leaf N : P of arbor significantly increases, leaf C : P and N : P of shrub significantly decrease, and leaf N content and C : N of herb extremely significantly ($P<0.01$) decreases and increases, respectively; with the increase of mean annual precipitation, leaf N : P of shrub significantly increases, and leaf N content and C : N of herb extremely significantly increases and decreases, respectively. Soil water content and soil organic carbon content are the main environmental factors affecting variations of leaf stoichiometric indexes of arbor, in which, leaf N content with soil water content and leaf C : P with soil organic carbon content show negative correlations at 0.05 level, and leaf P content shows positive correlations with the two environmental factors at 0.05 level, while leaf N : P shows negative correlations with the two environmental factors at 0.05 and 0.01 levels, respectively. Soil available phosphorus content and soil pH value are the main environmental factors affecting variations of leaf stoichiometric indexes of shrub, but only leaf P content shows a positive correlation with soil available phosphorus content at 0.05 level, and leaf C : P shows a negative correlation with soil available phosphorus content at 0.05 level. Soil water content, soil nitrate nitrogen content, and soil bulk density are the main environmental factors affecting variations of leaf stoichiometric indexes of herb, in which, leaf N content shows positive and negative correlations with soil water content and soil bulk density at 0.001 level, respectively, leaf C : N shows negative and positive correlations with the two environmental factors at 0.001 level, respectively, leaf C : P shows negative and positive correlations with the two environmental factors at 0.05 level, respectively, while leaf P content shows a negative correlation with soil bulk density at 0.05 level. In conclusion, the growth of arbor, shrub, and herb plants on the western slope of Helan Mountain is constrained by N, and the growth of shrub plants is also limited by P. The environmental factors affecting leaf stoichiometric indexes of different life form plants are different, therefore, corresponding measures should be made for different life form plants during the conservation and restoration of the vegetations on the western slope of Helan Mountain.

Key words: western slope of Helan Mountain; stoichiometric index; life form; environmental impact factor; nutrient limitation; vegetation protection

植物生态化学计量学主要研究植物体内的化学元素〔主要为碳(C)、氮(N)、磷(P)〕含量和比值及这些化学计量指标与环境因子的关系^[1]。研究植物的生态化学计量特征不但可以明确植物对自然资源的需求,还能够将不同层次的生态学研究联系起来^[2]。C、N、P是植物生长发育必需的化学元素,其中,C是构成植物体的主要元素^[3],N是合成氨基酸的主要元素^[2],P是构成细胞RNA和ATP的基本元素^[4],三者在植物生长和生理调节过程中发挥着至关重要的作用^[5-6]。研究表明:这3种元素含量在植物器官中的比值可用于判断植物对环境的适应能力及植物的养分限制类型^[7];探究植物叶片C、N、P含量及比值,对于判断植物养分利用策略、预测全球气候变化下的植被动态等具有重要意义^[1,8]。

目前,国内外关于植物化学计量特征与环境因子关系的研究较多,但多数研究针对的是同一生活型植物^[2,9-12],而针对某一区域不同生活型植物化学计量特征的研究却较少^[13-14]。研究表明:不同生活型植

物对环境资源的利用方式及其环境影响因子往往存在差异^[15-18]。因此,研究特定区域植物群落中乔木、灌木、草本层优势植物叶片的化学计量特征及其与环境因子的关系,对于探明不同生活型植物叶片的化学计量特征及其随环境因子的变化规律具有参考价值,并对理解植物养分利用策略具有一定意义。

贺兰山位于中国温带草原与荒漠的交界地带,拥有典型的温带山地森林生态系统。贺兰山西坡为干旱荒漠区,乔木、灌木、草本种类丰富,群落空间结构完善,为荒漠植物提供了良好的庇护场所^[19]。然而,目前仅见到关于贺兰山单一植被类型植物叶片化学计量特征的研究报道^[20],却未见针对贺兰山不同生活型植物叶片化学计量特征的研究报道。基于此,对贺兰山西坡典型植物群落乔木、灌木和草本优势种的叶片C、N、P含量及比值以及这些化学计量指标与年均温、年均降水量和土壤因子的关系进行了研究,旨在阐明贺兰山西坡不同生活型植物优势种的叶片化学计量特征及其随年均温和年均降水量变化的规律,

明确影响该区域不同生活型植物叶片化学计量特征的主要环境因子,以期为贺兰山植被生态保育与恢复研究提供参考依据。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

贺兰山位于内蒙古自治区与宁夏回族自治区的交界处,具体地理坐标为东经 105°20′~106°40′、北纬 38°07′~39°30′。贺兰山海拔 1 360~3 556 m 区域具有典型的山地气候特征,冬季盛行西北风,夏季多雷雨天;年均降水量 200~500 mm,降水主要集中在每年的 7 月至 9 月;山脚年均温 7.7 °C,主峰年均温 -2.8 °C;无霜期仅 60~70 d;年均蒸发量约 2 000 mm^{[21]6-7}。

贺兰山植物区系组成具有明显的过渡性,西坡为荒漠植被,且植被垂直带谱分化明显。随着海拔升高,贺兰山西坡植被依次为荒漠草原带、疏山林草原带、山地针叶林带、亚高山灌丛草甸带或高寒草甸带^[22],乔木种类主要有旱榆(*Ulmus glaucescens* Franch.)、紫丁香(*Syringa oblata* Lindl.)、杜松(*Juniperus rigida* Sieb. et Zucc.)、油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)、山杨(*Populus davidiana* Dode)、青海云杉(*Picea crassifolia* Kom.)等,灌木种类主要有红砂(*Reaumuria songarica* (Pall.) Maxim.)、松叶猪毛菜(*Salsola laricifolia* Turcz. ex Litv.)、斑籽麻黄(*Ephedra rhytidospema* Pachom.)、刺旋花(*Convolvulus tragacanthoides* Turcz.)、针枝芸香(*Haplophyllum tragacanthoides* Diels)、荒漠锦鸡儿(*Caragana roborovskiyi* Kom.)、单瓣黄刺玫(*Rosa xanthina* f. *normalis* Rehd. et E. H. Wils.)、西北栒子(*Cotoneaster zabelii* Schneid.)、置疑小檗(*Berberis dubia* Schneid.)、忍冬(*Lonicera japonica* Thunb.)、金露梅(*Dasiphora fruticosa* (Linn.) Rydb.)等,草本种类主要有冰草(*Agropyron cristatum* (Linn.) Gaertn.)、短花针茅(*Stipa breviflora* Griseb.)、大蓟(*Cirsium spicatum* Matsum.)、黑沙蒿(*Artemisia ordosica* Krasch.)、阿拉善鹅观草(*Elymus alashanicus* (Keng) S. L. Chen)、小红菊(*Chrysanthemum chanetii* H. Lévl.)、垂穗披碱草(*Elymus nutans* Griseb.)、祁连山藁草(*Carex allivescens* V. I. Krecz.)、白沙蒿(*Artemisia stelleriana* Bess.)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置及群落调查 于 2021 年 7 月至 8 月,在贺兰山西坡海拔 1 848~2 707 m 范围内选取具有典型性和代表性植被类型的区域设置样地,共 16 个样地,样地面积均大于 1 hm²。利用 eTrex Vista C 手持式 GPS 仪(美国 Garmin 公司)测定并记录样地的经度、纬度和海拔。

采用样方法^[23]进行植被调查。在每个样地内随机设置 3 个面积 20 m×20 m 的样方,调查样方内所有胸径大于或等于 1 cm 的乔木,记录每株乔木的种名、胸径〔使用胸径尺(精度 0.1 cm)测量〕、树高〔使用 CGQ-1 哈光林业测高器(精度 0.5 m)测量〕和冠幅〔使用皮尺(精度 0.1 cm)测量〕;采用五点取样法在每个样方内各设置 5 个面积 5 m×5 m 的灌木样方,记录每株灌木的种名、株高〔使用 CGQ-1 哈光林业测高器(精度 0.5 m)测量〕、冠幅〔使用皮尺(精度 0.1 cm)测量〕、盖度、株数和基径〔使用游标卡尺(精度 0.02 mm)测量〕;同样,采用五点取样法在每个样方内设置 5 个面积 1 m×1 m 的草本样方,记录每种草本的种名、平均高度、盖度和多度。冠幅为东西向和南北向冠幅的平均值。按照王育松等^[24]的方法计算物种重要值。

供试样地的基本信息及优势种见表 1。

1.2.2 植物样品采集及指标测定 随机选取样地内光照充足且发育良好的乔木、灌木和草本植物优势种成年植株 3~6 株,在乔木和灌木植株中上部向阳面取 2 个当年生枝条,在每个枝条上随机挑选完整且无病虫害的健康成熟叶片 10~15 枚;在草本植株上随机选取完整健康的成熟叶片 5~10 枚。将同一样地同种植物叶片混匀后装入信封中,带回实验室。

植物样品在 60 °C 烘箱内烘干 48 h 后,使用 GT300 振动球磨仪(北京格瑞德曼仪器设备有限公司)磨成粉末并过筛(孔径 0.15 mm),用于植物叶片 C、N、P 含量测定。其中,C 含量测定采用重铬酸钾氧化-外加热法^{[25]30-33};N 含量测定采用半微量开式法^{[25]42-44};P 含量测定采用钼锑抗比色法^{[25]76-78}。根据检测结果计算 C:N、C:P、N:P。每种植物重复取样测定 3 次。

1.2.3 土壤样品采集及指标测定 在每个样地随机选取 3 个取样点,采用环刀法^[26]测定 0~20 cm 土层土壤的容重;采用烘干法^{[25]22-24}测定 0~20 cm 土层土壤的含水量;每个取样点至少采集 500 g 土壤,过筛

(孔径 2.00 mm)后装入自封袋中,带回实验室风干后用于土壤化学指标测定。其中,全氮含量测定采用半微量开式法^{[25]42-44};全磷含量测定采用钼锑抗比色法^{[25]76-78};硝态氮含量测定采用酚二磺酸比色法^{[25]50-52};铵态氮含量测定采用 2 mol · L⁻¹ KCl 浸提-蒸馏法^{[25]53-56};速效磷含量测定采用 0.5 mol · L⁻¹

NaHCO₃法^{[25]81-83};土壤有机碳含量测定采用重铬酸钾氧化-外加加热法^{[25]30-33};pH 值测定时,按照质量比 2.5 : 1.0 将水和土混匀,使用 PB-10 pH 计(德国 Sartorius 公司)测定土壤 pH 值。根据检测结果计算 C : N、C : P、N : P。每个样地土壤重复取样测定 3 次。

表 1 贺兰山西坡供试样地的基本信息及不同生活型植物的优势种(重要值大于 10%)¹⁾
Table 1 Basic information and dominant species (importance value greater than 10%) of different life form plants in test plots on the western slope of Helan Mountain¹⁾

样地编号 No. of plot	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔/m Elevation	乔木优势种 Dominant species of arbor	灌木优势种 Dominant species of shrub	草本优势种 Dominant species of herb
P1	105°47'05"	38°41'25"	1 848	—	RS(50.2%),SL(48.8%)	SB(54.5%),AC(22.0%), LI(13.1%)
P2	105°47'10"	38°41'31"	1 856	—	CT(40.0%),ER(30.6%), SL(29.4%)	SB(56.1%),STG(21.6%), AF(10.7%)
P3	105°47'33"	38°39'43"	1 905	UG(100.0%)	RXN(23.9%),CR(18.7%), BD(10.6%)	EA(20.3%),AC(13.2%), ASp(10.3%)
P4	105°47'37"	38°39'44"	1 910	UG(100.0%)	RXN(23.5%),HT(18.4%), CR(12.4%),CSt(10.6%), CO(10.1%)	EA(42.8%),ASp(13.6%)
P5	105°48'17"	38°40'25"	2 107	—	CO(24.6%),DF(24.5%), CR(21.9%),HT(13.5%), CT(13.5%)	SB(63.2%),CSp(10.3%)
P6	105°48'40"	38°40'52"	2 110	—	CR(30.3%),DF(28.9%), HT(15.9%),PM(10.3%)	AC(22.6%),CSp(19.8%)
P7	105°54'38"	38°58'07"	2 123	SOB(26.8%),PT(24.9%), JR(23.2%),UG(10.1%)	CZ(37.5%),LJ(23.5%)	CA(49.8%),AO(14.5%)
P8	105°48'40"	38°40'52"	2 134	—	DF(20.8%),CZ(16.5%), RXN(14.1%),PM(12.1%), SS(11.0%),CR(10.3%)	SB(18.6%),AC(11.4%), EA(10.7%)
P9	105°54'40"	38°58'18"	2 150	PT(54.5%),SOB(25.5%), JR(20.0%)	CZ(73.1%),BD(17.1%)	CA(69.1%)
P10	105°52'50"	38°46'07"	2 160	UG(35.1%),JR(29.0%), SOB(24.7%)	DF(27.3%),RXN(19.8%), CZ(14.1%),BD(12.0%), LJ(10.7%),SS(10.1%)	EA(19.5%),AO(15.8%), SAI(13.8%),ASi(10.7%)
P11	105°49'40"	38°40'36"	2 160	JR(28.9%),PC(28.5%), PD(27.5%),SOB(15.1%)	BD(37.7%),CZ(25.6%), SS(12.8%)	CA(39.7%),EA(10.7%)
P12	105°51'09"	38°40'56"	2 350	PC(73.4%),JR(26.6%)	BD(73.5%)	CC(37.8%),CA(22.6%), EA(16.5%)
P13	105°51'13"	38°40'08"	2 360	JR(57.6%),PC(42.4%)	LJ(57.9%)	CA(28.4%),EA(19.3%)
P14	105°50'50"	38°39'41"	2 635	—	—	EN(29.7%),CA(19.1%), SOf(16.9%)
P15	105°50'46"	38°39'05"	2 664	PC(100.0%)	—	CA(75.7%)
P16	105°50'57"	38°38'56"	2 707	PC(100.0%)	DF(100.0%)	CA(24.3%),SAm(14.8%), EA(12.6%)

¹⁾ 括号内百分数为优势种的重要值 The percentages in brackets are importance values of dominant species. —: 无优势种 No dominant species. RS: 红砂 *Reaumuria songarica* (Pall.) Maxim.; SL: 松叶猪毛菜 *Salsola laricifolia* Turcz. ex Litv.; SB: 短花针茅 *Stipa breviflora* Griseb.; AC: 冰草 *Agropyron cristatum* (Linn.) Gaertn.; LI: 冬青叶兔唇花 *Lagochilus ilicifolius* Bunge ex Benth.; CT: 刺旋花 *Convolvulus tragacanthoides* Turcz.; ER: 斑叶麻黄 *Ephedra rhytidosperra* Pachom.; STG: 戈壁针茅 *Stipa tianschanica* var. *gobica* (Roshev.) P. C. Kuo et Y. H. Sun; AF: 灌木亚菊 *Ajania fruticulosa* (Ledeb.) Poljak.; UG: 旱榆 *Ulmus glaucescens* Franch.; RXN: 单瓣黄刺玫 *Rosa xanthina* f. *normalis* Rehd. et E. H. Wils.; CR: 荒漠锦鸡儿 *Caragana roborovskiyi* Kom.; BD: 置疑小檗 *Berberis dubia* Schneid.; EA: 阿拉善鹅观草 *Elymus alashanicus* (Keng) S. L. Chen; ASp: 芨芨草 *Achnatherum splendens* (Trin.) Nevski; HT: 针枝芸香 *Haplophyllum tragacanthoides* Diels; CSt: 狭叶锦鸡儿 *Caragana stenophylla* Pojark.; CO: 卷叶锦鸡儿 *Caragana ordosica* Y. Z. Zhao et al.; DF: 金露梅 *Dasiphora fruticosa* (Linn.) Rydb.; CSp: 大蓟 *Cirsium spicatum* Matsum.; PM: 蒙古扁桃 *Prunus mongolica* (Maxim.) Ricker; SOB: 紫丁香 *Syringa oblata* Lindl.; PT: 油松 *Pinus tabuliformis* Carr.; JR: 杜松 *Juniperus rigida* Sieb. et Zucc.; CZ: 西北栒子 *Cotoneaster zabelii* Schneid.; LJ: 忍冬 *Lonicera japonica* Thunb.; CA: 祁连草 *Carex allivescens* V. I. Krecz.; AO: 黑沙蒿 *Artemisia ordosica* Krasch.; SS: 绣线菊 *Spiraea salicifolia* Linn.; SAI: 木叶合耳菊 *Synotis atractylidifolia* (Ling) C. Jeffrey et Y. L. Chen; ASi: 白沙蒿 *Artemisia stelleriana* Bess.; PC: 青海云杉 *Picea crassifolia* Kom.; PD: 山杨 *Populus davidiana* Dode; CC: 小红菊 *Chrysanthemum chanetii* H. Lévl.; EN: 垂穗披碱草 *Elymus nutans* Griseb.; SOf: 地榆 *Sanguisorba officinali* Linn.; SAm: 草地风毛菊 *Saussurea amara* (Linn.) DC.

1.2.4 气候因子获取 根据贺兰山西坡气象站观测资料所建立的海拔与年均温和年均降水量的回归方程^[21]¹⁴,计算每个样地的年均温和年均降水量数据。

1.3 数据处理及统计分析

采用 EXCEL 2016 软件进行数据整理和统计分析,计算不同生活型及群落总体叶片的 C、N、P 含量及比值以及这些化学计量指标的标准差和变异系数,并采用 R 4.4.2 软件中的 ggpubr 程序包进行单因素方差分析(one-way ANOVA)和 Wilcox 检验。

采用 R 4.4.2 软件中的 ggplot2 程序包,对不同生活型植物叶片化学计量指标与年均温和年均降水量分别进行线性回归分析并绘图。

采用 EXCEL 2016 软件,利用物种丰度计算各样地乔木、灌木和草本优势种叶片化学计量指标的群落加权平均值;选取年均温、年均降水量以及土壤的含水量、pH 值、容重、有机碳含量、全氮含量、全磷含量、硝态氮含量、铵态氮含量、速效磷含量、C : N、C : P、N : P,采用 Canoco 5.0 软件对不同生活型植物叶片化学计量指标与上述环境因子进行冗余分析(RDA)和蒙特卡洛置换检验,再选取贡献率排名前 9 且 2 个轴总解释率大于 80%的环境因子,重新进行冗余分析。然后,选取贡献率大且显著性检验达显著水平的环境因子,使用 R 4.4.2 软件中的 psych 程序包,对不同生活型植物叶片化学计量指标的群落加权平均值与上述环境因子进行 Pearson 相关性分析。

2 结果和分析

2.1 不同生活型植物叶片化学计量指标的比较

统计结果(表 2)显示:贺兰山西坡植物总体叶片 C、N 和 P 含量分别为 431.58、15.66 和 1.79 mg · g⁻¹。3 个生活型中,乔木叶片 C、N 和 P 含量均最高,分别为 466.45、16.16 和 1.90 mg · g⁻¹,其中,乔木叶片 C

含量显著($P < 0.05$)高于灌木和草本,但乔木与灌木和草本间的叶片 N 和 P 含量差异不显著($P > 0.05$),灌木和草本间的叶片 C、N 和 P 含量差异也不显著。从变异系数看,总体叶片 C 含量变异幅度最小(8.93%),叶片 N 和 P 含量变异幅度较大(分别为 18.43%和 21.72%)。3 个生活型中,灌木叶片 C 和 P 含量的变异系数最大(分别为 9.00%和 25.46%),草本叶片 N 含量的变异系数最大(23.07%)。

由表 2 还可见:贺兰山西坡植物总体叶片 C : N、C : P 和 N : P 分别为 28.62、254.87 和 9.11。3 个生活型中,灌木叶片 C : N 最低(26.70),且显著低于草本和乔木植物;而不同生活型间的叶片 C : P 和 N : P 均无显著差异。值得注意的是,该研究区乔木、灌木和草本叶片 N : P 均小于 10,总体叶片 N : P 也小于 10。从变异系数看,该区域植物总体叶片 C : N、C : P 和 N : P 的变异幅度均较大(分别为 22.01%、29.35%和 28.49%)。3 个生活型中,灌木叶片 C : P 和 N : P 的变异系数最大(分别为 34.51%和 32.33%),草本叶片 C : N 的变异系数最大(25.22%)。

2.2 不同生活型植物叶片化学计量指标与年均温和年均降水量的关系分析

以年均温或年均降水量为自变量 x 、植物叶片化学计量指标为因变量 y ,对贺兰山西坡乔木、灌木和草本叶片化学计量指标与年均温和年均降水量分别进行线性回归分析,结果见图 1 和图 2。

由图 1 可见:随着年均温的升高,3 个生活型叶片 C 和 P 含量均无明显的变化规律,3 个生活型叶片 N 含量、C : N、C : P 和 N : P 多数也无明显的变化规律,仅乔木叶片 N : P 显著($P < 0.05$)升高,灌木叶片 C : P 和 N : P 显著降低,草本叶片 N 含量极显著($P < 0.01$)降低、C : N 极显著升高。

由图 2 可见:随着年均降水量的升高,3 个生活型叶片 C 含量、P 含量和 C : P 均无明显的变化规

表 2 贺兰山西坡不同生活型植物叶片化学计量指标的比较($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 2 Comparison on leaf stoichiometric indexes of different life form plants on the western slope of Helan Mountain ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

生活型 Life form	C 含量/(mg · g ⁻¹) C content	N 含量/(mg · g ⁻¹) N content	P 含量/(mg · g ⁻¹) P content	C : N	C : P	N : P
草本 Herb	424.21±5.10b(7.51%)	14.99±0.55a(23.07%)	1.75±0.06a(21.65%)	29.99±1.20a(25.22%)	257.34±12.02a(29.18%)	8.80±0.33a(23.54%)
灌木 Shrub	420.69±5.71b(9.00%)	16.00±0.30a(12.49%)	1.78±0.07a(25.46%)	26.70±0.61b(15.23%)	255.86±13.31a(34.51%)	9.63±0.47a(32.33%)
乔木 Arbor	466.45±6.15a(6.19%)	16.16±0.65a(18.83%)	1.90±0.04a(10.93%)	30.03±1.39a(21.67%)	248.49±6.89a(13.18%)	8.64±0.44a(23.19%)
总体 All	431.58±3.75(8.90%)	15.66±0.28(18.43%)	1.79±0.04(21.72%)	28.62±0.61(22.01%)	254.87±7.30(29.35%)	9.11±0.25(28.49%)

¹⁾ 同列中不同小写字母表示同一指标在不同生活型间差异显著($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) differences of the same index between different life forms. 括号内百分数为变异系数 The percentages in brackets are the coefficients of variation.

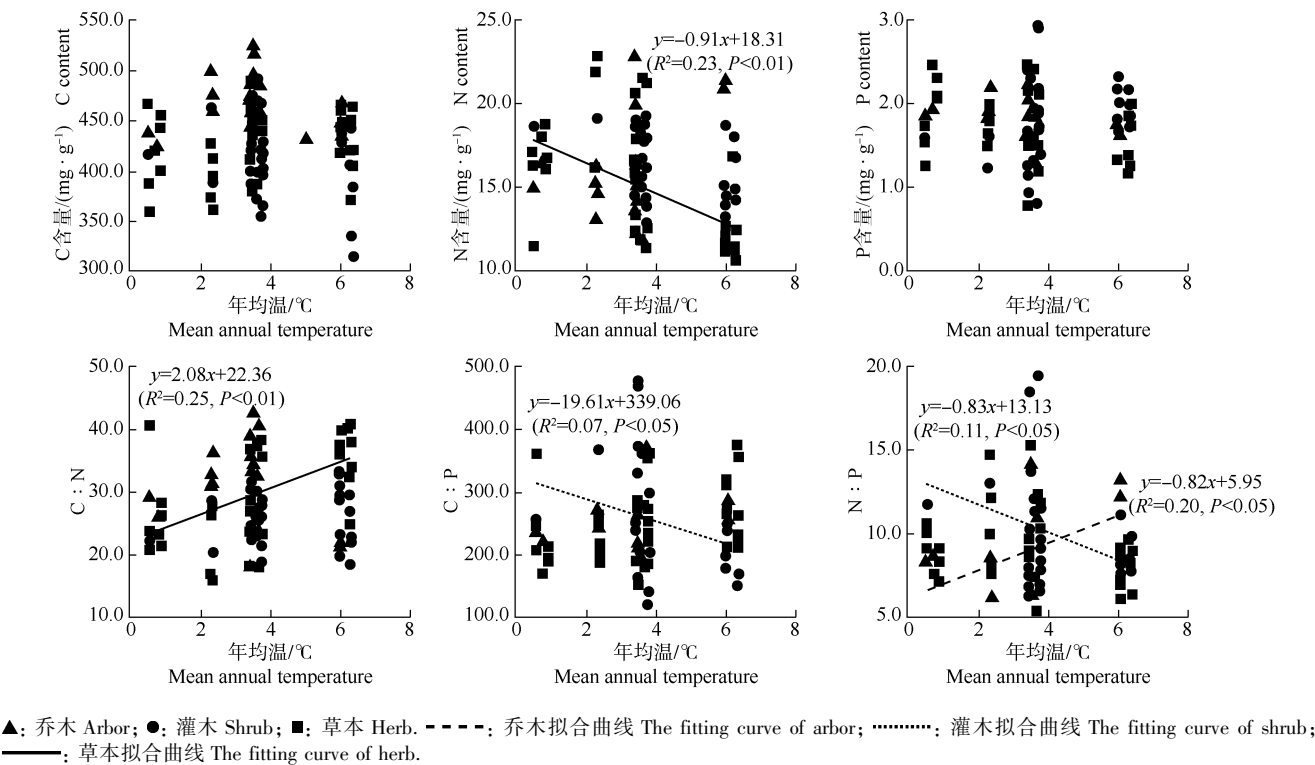


图 1 贺兰山西坡不同生活型植物叶片化学计量指标与年均温的线性回归分析
Fig. 1 Linear regression analysis on leaf stoichiometric indexes of different life form plants and annual mean temperature on the western slope of Helan Mountain

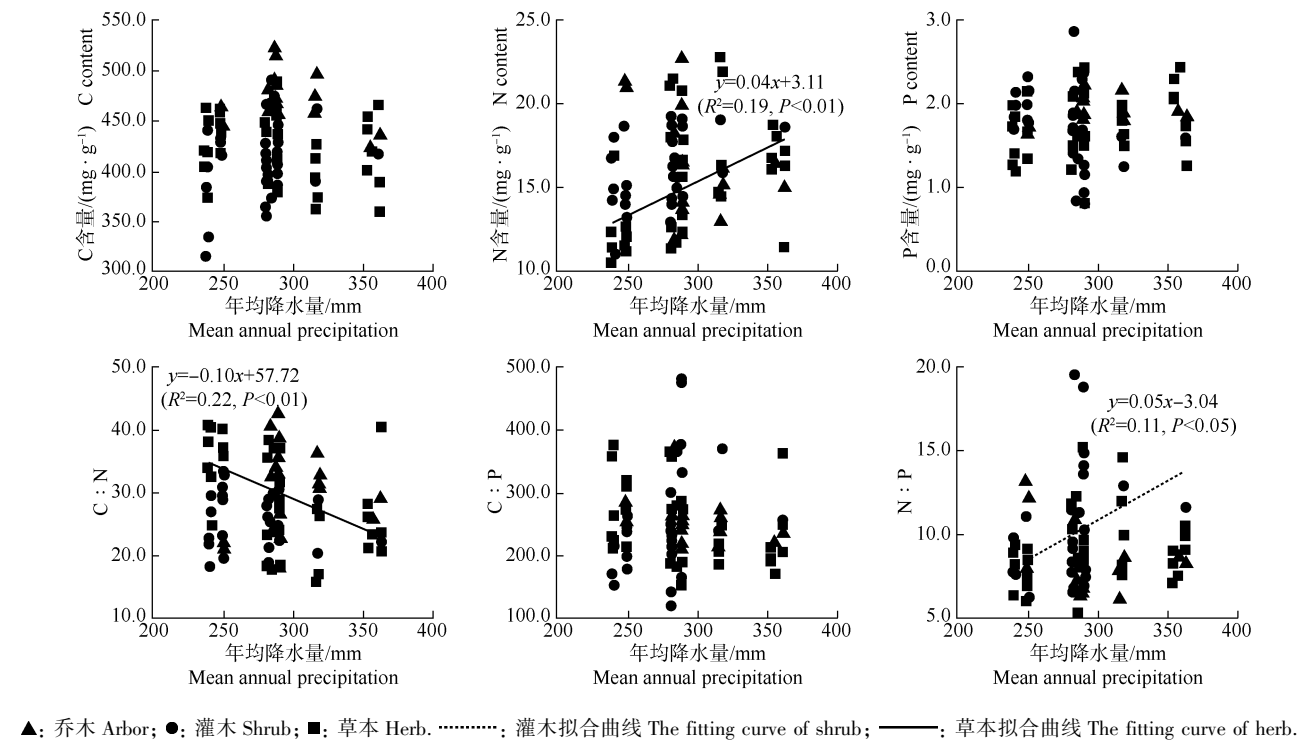


图 2 贺兰山西坡不同生活型植物叶片化学计量指标与年均降水量的线性回归分析
Fig. 2 Linear regression analysis on leaf stoichiometric indexes of different life form plants and annual mean precipitation on the western slope of Helan Mountain

律,3个生活型叶片N含量、C:N和N:P多数也无明显的变化规律,仅灌木叶片N:P显著升高,草本叶片N含量极显著升高、C:N极显著降低。

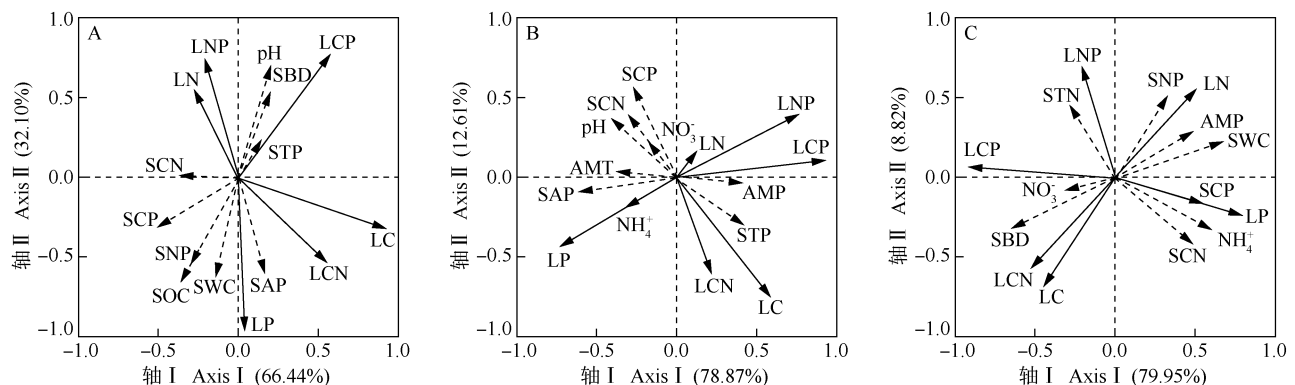
2.3 不同生活型植物叶片化学计量指标与环境因子的关系分析

冗余分析结果(图3-A)表明:供试环境因子可解释乔木叶片化学计量指标98.54%的变异,轴I和轴II可分别解释66.44%和32.10%的变异。显著性检验结果(表3)显示:各环境因子对乔木叶片化学计量指标的影响均不显著($P>0.05$),土壤有机碳含量和土壤含水量是影响乔木叶片化学计量指标的主要环境因子,二者对乔木叶片化学计量指标变异的贡献率分别为24.5%和18.4%。对乔木叶片化学计量指标与这2个环境因子进行相关性分析,结果(表4)表明:乔木叶片N含量与土壤含水量在0.05水平呈负相关,乔木叶片P含量与这2个环境因子均在0.05水平呈正相关,乔木叶片C:P与土壤有机碳含量在0.05水平呈负相关,乔木叶片N:P与土壤有机碳含量和土壤含水量分别在0.05和0.01水平呈负相关。

冗余分析结果(图3-B)表明:供试环境因子可解释灌木叶片化学计量指标91.48%的变异,轴I和轴II可分别解释78.87%和12.61%的变异。显著性检验结果(表5)显示:各环境因子中,土壤速效磷含

量和土壤pH值对灌木叶片化学计量指标的影响显著($P<0.05$),是影响灌木叶片化学计量指标的主要环境因子,二者对灌木叶片化学计量指标变异的贡献率分别为34.4%和19.3%。对灌木叶片化学计量指标与这2个环境因子进行相关性分析,结果(表6)表明:仅灌木叶片P含量与土壤速效磷含量在0.05水平呈正相关,而灌木叶片C:P与土壤速效磷含量在0.05水平呈负相关。

冗余分析结果(图3-C)表明:供试环境因子可解释草本叶片化学计量指标88.77%的变异,轴I和轴II可分别解释79.95%和8.82%的变异。显著性检验结果(表7)显示:各环境因子中,土壤含水量、土壤硝态氮含量和土壤容重对草本叶片化学计量指标的影响显著或极显著($P<0.01$),是影响草本叶片化学计量指标的主要环境因子,三者对草本叶片化学计量指标变异的贡献率分别为39.4%、16.2%和8.2%。对草本叶片化学计量指标与这3个环境因子进行相关性分析,结果(表8)表明:草本叶片N含量与土壤含水量和土壤容重在0.001水平分别呈正相关和负相关,草本叶片C:N与这2个环境因子在0.001水平分别呈负相关和正相关,草本叶片C:P与这2个环境因子在0.05水平分别呈负相关和正相关,草本叶片P含量还与土壤容重在0.05水平呈负相关。



LC: 叶片C含量 Leaf C content; LN: 叶片N含量 Leaf N content; LP: 叶片P含量 Leaf P content; LCN: 叶片C:N Leaf C:N; LCP: 叶片C:P Leaf C:P; LNP: 叶片N:P Leaf N:P; AMT: 年均温 Annual mean temperature; AMP: 年均降水量 Annual mean precipitation; SOC: 土壤有机碳含量 Soil organic carbon content; STN: 土壤全氮含量 Soil total nitrogen content; STP: 土壤全磷含量 Soil total phosphorus content; SCN: 土壤C:N Soil C:N; SCP: 土壤C:P Soil C:P; SNP: 土壤N:P Soil N:P; NH_4^+ : 土壤铵态氮含量 Soil ammonium nitrogen content; NO_3^- : 土壤硝态氮含量 Soil nitrate nitrogen content; SAP: 土壤速效磷含量 Soil available phosphorus content; pH: 土壤pH值 Soil pH value; SBD: 土壤容重 Soil bulk density; SWC: 土壤含水量 Soil water content. 括号内百分数为轴的贡献率 The percentages in the brackets are the contribution rates of the axes.

A: 乔木 Arbor; B: 灌木 Shrub; C: 草本 Herb.

图3 贺兰山西坡不同生活型植物叶片化学计量指标与相关环境因子的冗余分析
Fig. 3 Redundancy analysis on leaf stoichiometric indexes of different life form plants and related environmental factors on the western slope of Helan Mountain

表 3 影响贺兰山西坡乔木叶片化学计量指标的环境因子显著性检验
Table 3 Significance test of environmental factors affecting leaf stoichiometric indexes of arbor on the western slope of Helan Mountain

环境因子 Environmental Factor	贡献率/% Contribution rate	F 值 F value	P 值 P value
土壤有机碳含量 Soil organic carbon content	24.5	2.6	0.100
土壤含水量 Soil water content	18.4	2.3	0.144
土壤 C : P Soil C : P	18.1	2.8	0.100
土壤 N : P Soil N : P	16.4	3.6	0.070
土壤容重 Soil bulk density	11.4	4.1	0.068
土壤 pH 值 Soil pH value	5.0	2.5	0.142
土壤 C : N Soil C : N	2.9	1.8	0.334
土壤速效磷含量 Soil available phosphorus content	2.6	4.1	0.236
土壤全磷含量 Soil total phosphorus content	0.6	0.1	1.000

表 4 贺兰山西坡乔木叶片化学计量指标与主要环境影响因子的相关性分析
Table 4 Correlation analysis on leaf stoichiometric indexes of arbor and main environmental impact factors on the western slope of Helan Mountain

叶片化学计量指标 Leaf stoichiometric index	与主要环境影响因子的相关系数 ¹⁾ Correlation coefficient with main environmental impact factors ¹⁾	
	土壤有机碳含量 Soil organic caron content	土壤含水量 Soil water content
C 含量 C content	-0.12	0.27
N 含量 N content	-0.54	-0.73 *
P 含量 P content	0.64 *	0.71 *
C : N	0.48	0.73
C : P	-0.72 *	-0.47
N : P	-0.66 *	-0.77 **

¹⁾ *: $P<0.05$; **: $P<0.01$.

表 5 影响贺兰山西坡灌木叶片化学计量指标的环境因子显著性检验
Table 5 Significance test of environmental factors affecting leaf stoichiometric indexes of shrub on the western slope of Helan Mountain

环境因子 Environmental Factor	贡献率/% Contribution rate	F 值 F value	P 值 P value
土壤速效磷含量 Soil available phosphorus content	34.4	6.3	0.018
土壤 pH 值 Soil pH value	19.3	4.6	0.034
土壤铵态氮含量 Soil ammonium nitrogen content	7.8	2.4	0.132
土壤全磷含量 Soil total phosphorus content	7.7	4.0	0.076
土壤 C : N Soil C : N	6.7	2.4	0.180
土壤 C : P Soil C : P	6.3	1.6	0.230
土壤硝态氮含量 Soil nitrate nitrogen content	6.2	1.6	0.206
年均降水量 Mean annual precipitation	1.8	0.9	0.408
年均温 Mean annual temperature	1.4	0.7	0.472

表 6 贺兰山西坡灌木叶片化学计量指标与主要环境影响因子的相关性分析
Table 6 Correlation analysis on leaf stoichiometric indexes of shrub and main environmental impact factors on the western slope of Helan Mountain

叶片化学计量指标 Leaf stoichiometric index	与主要环境影响因子的相关系数 ¹⁾ Correlation coefficient with main environmental impact factors ¹⁾	
	土壤速效磷含量 Soil available phosphorus content	土壤 pH 值 Soil pH value
C 含量 C content	-0.28	-0.52
N 含量 N content	0.08	-0.53
P 含量 P content	0.61 *	0.24
C : N	-0.39	0.04
C : P	-0.66 *	-0.29
N : P	-0.50	-0.22

¹⁾ *: $P<0.05$.

表 7 影响贺兰山西坡草本叶片化学计量指标的环境因子显著性检验
Table 7 Significance test of environmental factors affecting leaf stoichiometric indexes of herb on the western slope of Helan Mountain

环境因子 Environmental Factor	贡献率/% Contribution rate	F 值 F value	P 值 P value
土壤含水量 Soil water content	39.4	8.7	0.008
土壤硝态氮含量 Soil nitrate nitrogen content	16.2	5.1	0.022
土壤 C : N Soil C : N	9.4	2.3	0.100
土壤容重 Soil bulk density	8.2	3.6	0.040
土壤全氮含量 Soil total nitrogen content	6.7	2.4	0.102
土壤铵态氮含量 Soil ammonium nitrogen content	3.8	1.8	0.202
土壤 N : P Soil N : P	3.6	2.0	0.168
年均降水量 Mean annual precipitation	2.8	1.4	0.322
土壤 C : P Soil C : P	1.5	0.8	0.504

表 8 贺兰山西坡草本叶片化学计量指标与主要环境影响因子的相关性分析
Table 8 Correlation analysis on leaf stoichiometric indexes of herb and main environmental impact factors on the western slope of Helan Mountain

叶片化学计量指标 Leaf stoichiometric index	与主要环境影响因子的相关系数 ¹⁾ Correlation coefficient with main environmental impact factors ¹⁾		
	土壤含水量 Soil water content	土壤硝态氮含量 Soil nitrate nitrogen content	土壤容重 Soil bulk density
C 含量 C content	-0.46	0.18	0.47
N 含量 N content	0.86 ***	-0.11	-0.81 ***
P 含量 P content	0.46	-0.19	-0.55 *
C : N	-0.87 ***	0.16	0.81 ***
C : P	-0.52 *	0.20	0.59 *
N : P	0.27	-0.10	-0.19

¹⁾ *: $P<0.05$; ***: $P<0.001$.

3 讨 论

3.1 贺兰山西坡植物叶片化学计量指标的总体特征

调查统计结果表明:贺兰山西坡灌木和草本叶片 C 含量(分别为 420.69 和 $424.21 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)显著($P < 0.05$)低于乔木($466.45 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$),这可能是不同植物自身的生长特性决定的^[10],例如,乔木叶片 C 含量越高,表示其光合速率越低,生长速率越慢,抵御外界环境胁迫的能力越强^[27]。比较发现,贺兰山西坡植物总体叶片 C 含量($431.58 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)低于全球陆生植物叶片 C 含量的平均值($461.60 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)^[28]、中国东部森林生态系统优势植物叶片 C 含量的平均值($480.10 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)^[29]和黄土高原植物叶片 C 含量的平均值($438.00 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)^[30],这可能与荒漠区土壤养分含量相对较低,植物对土壤养分的再利用率较低有关^[31]。贺兰山西坡 3 个生活型植物叶片 C 含量及总体叶片 C 含量的变异系数均最小,分析认为这与 C 在植物体内主要起骨架作用、受环境影响较小有关^[32]。研究发现,植物所需的氮源主要来自雨水中硝态氮和铵态氮、硝态盐的风尘堆积以及生物固氮作用^[33]。贺兰山西坡植物总体叶片 N 含量($15.66 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)低于中国陆生植物叶片 N 含量的平均值($18.60 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)^[34]和中国东部森林生态系统优势植物叶片 N 含量的平均值($18.30 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)^[29],推测这可能与贺兰山西坡气候干旱有关。贺兰山西坡植物总体叶片 P 含量($1.79 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)也低于全球陆生植物叶片 P 含量的平均值($1.99 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)^[28]和中国东部森林生态系统优势植物叶片 P 含量的平均值($2.00 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)^[29],这是因为贺兰山区域气候整体偏干旱,降水量较少,降低了土壤微生物的活性^[6],导致土壤微生物对 P 的分解作用减弱,从而使土壤 P 含量下降。杨惠敏等^[9]认为,草本植物的叶片 N 和 P 含量通常高于木本植物,而本研究结果却恰好相反,这可能与不同生活型植物的样本数量和采样时节有关^[35-36]。

本研究中,贺兰山西坡植物总体叶片 N : P 为 9.11,略低于 10,说明贺兰山西坡植物的生长主要受 N 限制^[20,37],符合“中国植被生长通常受 N 限制”的结论^[34]。叶片 C : N 和 C : P 可以用来衡量植物吸收养分的碳同化能力,在一定程度上反映了植物的养分利用效率,数值越低,表明植物叶片对 N 和 P 的利

用效率越低,反之则越高^[10]。贺兰山西坡植物总体叶片 C : N (28.62)高于全球植物叶片 C : N 的平均值(23.80)^[38],而贺兰山西坡植物总体叶片 C : P (254.87)却低于全球植物叶片 C : P 的平均值(300.90)^[38],说明贺兰山西坡植物总体上对 N 的利用效率较高,而对 P 的利用效率却较低。研究发现,不同生活型植物对 N 的利用策略不同^[15]。贺兰山西坡草本和乔木叶片 C : N 显著($P < 0.05$)高于灌木,说明贺兰山西坡草本和乔木植物对 N 的利用效率更高。

3.2 年均温和年均降水量对贺兰山西坡不同生活型植物叶片化学计量指标的影响

植物叶片化学计量指标常常受年均温和年均降水量的影响^[39],不同生活型植物叶片 C、N、P 含量与环境因子的关系各异^[16]。草本植物结构简单、生长较快、寿命较短,其化学计量内稳态调节可能相对较弱,更容易受环境影响^[16,40],而乔木和灌木植物生长相对缓慢,其化学计量指标受生长环境长期作用,形成相对稳定的状态^[15]。本研究发现,随着年均温逐渐降低和年均降水量逐渐升高,贺兰山西坡草本叶片 N 含量均极显著($P < 0.01$)升高,而灌木和乔木叶片 N 含量却无明显变化,说明贺兰山西坡的草本植物较乔木和灌木植物更易受年均温和年均降水量的影响,这一研究结果支持“温度-植物生理假说”^[1]。该研究结果与前人研究结果一致^[41-43],可在一定程度上解释一些高寒和高纬度地区植物叶片 N 含量较高的原因^[38]。

贺兰山西坡乔木叶片 N : P 随着年均温的升高而升高,符合“温度-生物地球化学假说”的观点^[1],即随着温度升高,土壤中的微生物活性和土壤 N 的矿化速率升高,从而提高了土壤 N 的可利用性。本研究中,随着温度降低,贺兰山西坡灌木叶片 C : P 和 N : P 升高,表明低温条件下,贺兰山西坡灌木植物对 P 的利用效率升高,推测可能是在低温下土壤 P 紧缺,灌木植物通过自身生理调控提高了叶片的 P 利用效率^[10]。草本叶片 C : N 随着年均温的降低而降低,这可能是因为低温下植物需要更多的 N 来弥补生理效率的降低^[1],导致草本植物对 N 的需求量更高。此外,贺兰山西坡位于干旱荒漠区,降水量是影响植物生长发育的主要环境因子,可通过调节土壤理化性质直接或间接影响植物养分含量^[44]。本研究中,乔木叶片 N : P 随着降水量的升高而升高,推测

可能是因为降水增加了土壤中的 N 含量^[33]。而随着降水量降低,土壤中的 N 减少,草本植物通过自身生理调控提高了对 N 的利用效率,导致其叶片 C : N 升高。虽然相关研究已经表明植物叶片 C 和 P 含量也会受气候因子的影响^[45],但本研究并未发现贺兰山西坡不同生活型植物叶片 C 和 P 含量与年均温和年均降水量有关,这可能与本研究空间尺度较小及研究区域气候的特殊性有关。

3.3 相关环境因子对贺兰山西坡不同生活型植物叶片化学计量指标的影响

土壤是植物赖以生存的物质基础,能显著影响植物个体生长和群落组成^[27]。研究发现,植物叶片化学计量指标不仅受气候因子影响,还与土壤理化性质密切相关^[7,10,35]。本研究中,贺兰山西坡乔木叶片化学计量指标主要受土壤有机碳含量和土壤含水量的影响。贺兰山西坡乔木叶片 P 含量与土壤有机碳含量在 0.05 水平呈正相关,这与土壤有机碳含量与植物叶片凋落物和根系凋亡的分解和释放密切相关有关^[46],植物凋落物分解后可形成土壤有机质,而土壤有机质则分解矿化为植物生长必需的营养元素,如 P^[47]。贺兰山西坡乔木叶片 P 含量与土壤含水量在 0.05 水平呈正相关,而乔木叶片 N 含量则与土壤含水量在 0.05 水平呈负相关,这可能是因为土壤中的水分能够促进土壤微生物的生长,进而促进乔木对 N 和 P 的吸收^[7],但在缺水条件下,植物叶片寿命延长,导致植物对 N 的利用时间变长,在一定程度上提高了 N 的利用效能^[48]。

贺兰山西坡灌木叶片化学计量指标主要受土壤速效磷含量和土壤 pH 值的影响,其中,灌木叶片 P 含量与土壤速效磷含量在 0.05 水平呈正相关,而叶片 C : P 与土壤速效磷含量在 0.05 水平呈负相关,说明贺兰山西坡的灌木植物生长还受到 P 限制^[44]。相关研究结果表明:当植物生长受到某种元素限制时,植物叶片内该元素的浓度与土壤提供此养分的能力呈正相关^[49],而土壤中的速效磷是灌木植物获取 P 的重要途径^[4]。另外,通常情况下,土壤 pH 值对植物生长至关重要^[43],不但能够调节土壤养分转化方式,还能够影响土壤微生物的活动,从而对土壤肥力、有机质分解、氮矿化和植物生长等产生较大影响^[50]。根据土壤 pH 值对贺兰山西坡灌木叶片化学计量指标变异的贡献率为 19.3%,推断贺兰山西坡灌木植物的生长发育受到土壤 pH 值的影响。

本研究结果显示:贺兰山西坡草本叶片化学计量指标主要受土壤含水量、土壤硝态氮含量和土壤容重的影响,其中,土壤含水量与草本叶片 N 含量在 0.001 水平呈正相关,与草本叶片 C : N 和 C : P 分别在 0.001 和 0.05 水平呈负相关。这主要是因为贺兰山西坡为干旱区,而土壤含水量是干旱区植物生长的重要环境因子^[7],因此,土壤含水量增加促进了干旱区草本植物叶片对 N 和 P 的吸收^[40]。土壤容重能够反映土壤紧实度,通常土壤容重越大,土壤含水量越低,土壤越紧实^[51]。与土壤含水量相比,贺兰山西坡草本叶片化学计量指标与土壤容重的相关性恰好相反,表明土壤容重与土壤含水量能够共同影响贺兰山西坡草本叶片化学计量指标。此外,草本叶片 P 含量与土壤容重在 0.05 水平呈负相关,说明在贺兰山西坡,土壤越松软,草本植物对 P 的吸收能力越强。

4 结 论

综上所述,贺兰山西坡不同生活型植物生长均受 N 限制,灌木植物生长还受 P 限制。该区域不同生活型植物叶片化学计量指标与不同环境因子的关系各异,说明贺兰山西坡乔木、灌木和草本植物受不同环境因子的影响,其中,乔木植物主要受土壤有机碳含量和土壤含水量的影响,灌木植物主要受土壤速效磷含量和土壤 pH 值的影响,草本植物主要受土壤含水量、土壤硝态氮含量和土壤容重的影响,这是植物在长期进化中形成的适应机制,且与植物自身的遗传特性有关。因此,在保护和恢复贺兰山西坡植被时,应根据不同生活型植物制定相应的措施。乔木植物可增加土层厚度,保水保湿;灌木植物应多注重土壤养分管理;草本植物则应合理浇水,施加无机氮肥,定期松土,防止土壤板结。

参考文献:

- [1] 田 地,严正兵,方精云.植物生态化学计量特征及其主要假说[J].植物生态学报,2021,45(7):682-713.
- [2] YANG Y, LIU B R, AN S S. Ecological stoichiometry in leaves, roots, litters and soil among different plant communities in a desertified region of Northern China [J]. Catena, 2018, 166: 328-338.
- [3] 王晓琳,王 寅,何奕成,等.黑河下游植物碳氮化学计量特征及其影响因素[J].北京林业大学学报,2023,45(4):50-59.
- [4] 何 敏,许秋月,夏 允,等.植物磷获取机制及其对全球变化的响应[J].植物生态学报,2023,47(3):291-305.

- [5] 刘 婧, 缙倩倩, 王国华, 等. 晋西北丘陵风沙区柠条锦鸡儿叶片与土壤生态化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2023, 47(4): 546-558.
- [6] 闫鑫泽, 段嵩岚, 郑蓉蓉, 等. 土壤氮浓度对油松天然林新生枝叶碳氮磷化学计量及其内稳态的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(2): 294-300, 309.
- [7] 孙 力, 贡 璐, 朱美玲, 等. 塔里木盆地北缘荒漠典型植物叶片化学计量特征及其与土壤环境因子的关系[J]. 生态学杂志, 2017, 36(5): 1208-1214.
- [8] 陈 黎, 刘成功, 钱莹莹, 等. 南方红豆杉人工林针叶 C、N、P 化学计量特征[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(5): 53-61.
- [9] 杨惠敏, 王冬梅. 草-环境系统植物碳氮磷生态化学计量学及其对环境因子的响应研究进展[J]. 草业学报, 2011, 20(2): 244-252.
- [10] 蔡 琴, 丁俊祥, 张子良, 等. 青藏高原东缘主要针叶树种叶片碳氮磷化学计量分布格局及其驱动因素[J]. 植物生态学报, 2019, 43(12): 1048-1060.
- [11] 白悦莹, 许仲林, 徐昕亿. 新疆伊犁天山北坡草本植物群落不同功能群叶片 N、P 化学计量特征及其与环境因子的关系[J]. 植物资源与环境学报, 2022, 31(4): 37-49.
- [12] 杨 蕾, 孙 晗, 樊艳文, 等. 长白山木本植物叶片氮磷含量的海拔梯度格局及影响因子[J]. 植物生态学报, 2017, 41(12): 1228-1238.
- [13] 胡耀升, 么旭阳, 刘艳红. 长白山森林不同演替阶段植物与土壤氮磷的化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2014, 25(3): 632-638.
- [14] 朱 亮, 顾国军, 徐振锋, 等. 北亚热带常绿阔叶林乔灌木物种的碳氮磷生态化学计量比[J]. 应用与环境生物学报, 2019, 25(6): 1277-1285.
- [15] 覃张芬, 汤松波, 旷远文, 等. 热带珊瑚岛不同生活型植物叶片性状及其生态适应性意义[J]. 热带亚热带植物学报, 2022, 30(6): 855-862.
- [16] 王怀宾, 胥 晓, 杨万勤, 等. 城市园林不同生活型植物叶片碳、氮、磷生态化学计量特征及其对台风的响应[J]. 生态学报, 2021, 41(22): 8931-8938.
- [17] 姜沛沛, 曹 扬, 陈云明. 陕西省森林群落乔灌木叶片和凋落物 C、N、P 生态化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2016, 27(2): 365-372.
- [18] 黄 小, 姚 兰, 王 进, 等. 土壤养分对不同生活型植物叶功能性状的影响[J]. 西北植物学报, 2018, 38(12): 2293-2302.
- [19] 张义辉, 郑敬刚, 何明珠, 等. 贺兰山西坡植物多样性研究[J]. 河南科学, 2010, 28(2): 176-178.
- [20] 任运涛, 徐 翀, 张晨曦, 等. 贺兰山青海云杉针叶 C、N、P 含量及其计量比随环境因子的变化特征[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(6): 185-191.
- [21] 牛得草. 贺兰山西坡植物叶片碳氮磷化学计量学特征[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
- [22] WU M, PANG D, CHEN L, et al. Chemical composition of soil organic carbon and aggregate stability along an elevation gradient in Helan Mountains, northwest China [J]. Ecological Indicators, 2021, 131: 108228.
- [23] 杨 壹, 邱开阳, 李静尧, 等. 贺兰山东坡典型植物群落多样性垂直分布特征与土壤因子的关系[J]. 生态学报, 2023, 43(12): 1-10.
- [24] 王育松, 上官铁梁. 关于重要值计算方法的若干问题[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2010, 33(2): 312-316.
- [25] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [26] 江胜国. 国内土壤容重测定方法综述[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(S2): 82-86.
- [27] 王 强, 杨鸿淋, 徐春晖, 等. 涪江中游 4 种造林树种碳氮磷化学计量及养分重吸收特征[J]. 四川农业大学学报, 2023, 41(3): 437-445.
- [28] ELSER J J, FAGAN W F, DENNO R F, et al. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs [J]. Nature, 2000, 408(6812): 578-580.
- [29] 任书杰, 于贵瑞, 姜春明, 等. 中国东部南北样带森林生态系统 102 个优势种叶片碳氮磷化学计量学统计特征[J]. 应用生态学报, 2012, 23(3): 581-586.
- [30] BAI X, WANG B, AN S, et al. Response of forest species to C:N:P in the plant-litter-soil system and stoichiometric homeostasis of plant tissues during afforestation on the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2019, 183: 104186.
- [31] 王 晶, 殷 飞, 林 宁. 叶尔羌河流域荒漠河岸林胡杨叶片和凋落叶的生态化学计量特征[J]. 植物资源与环境学报, 2021, 30(5): 42-49.
- [32] 许雪鹭, 秦燕燕, 曹建军, 等. 青藏高原火绒草叶片生态化学计量特征随海拔的变化[J]. 应用生态学报, 2018, 29(12): 3934-3940.
- [33] WALVOORD M A, PHILLIPS F M, STONESTROM D A, et al. A reservoir of nitrate beneath desert soils [J]. Science, 2003, 302(5647): 1021-1024.
- [34] HAN W X, FANG J Y, GUO D L, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China [J]. New Phytologist, 2005, 168(2): 377-385.
- [35] 郁国梁, 王军强, 马紫荆, 等. 博斯腾湖湖滨湿地优势植物叶片碳、氮、磷化学计量特征的季节动态及其影响因子[J]. 植物资源与环境学报, 2022, 31(5): 9-18.
- [36] 刘岑薇, 郑向丽, 王俊宏, 等. 陆生和水域生态系统植物的 C、N、P 生态化学计量特征研究综述[J]. 中国农学通报, 2017, 33(17): 70-75.
- [37] 黄菊莹, 赖荣生, 余海龙, 等. N 添加对宁夏荒漠草原植物和土壤 C:N:P 生态化学计量特征的影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(11): 2850-2856.
- [38] 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.
- [39] 田 地, 严正兵, 方精云. 植物化学计量学: 一个方兴未艾的

- 生态学研究[J]. 自然杂志, 2018, 40(4): 235-241.
- [40] 刘小菊, 单奇, 李园园. 喀纳斯泰加林林下72种植物叶片的碳、氮、磷化学计量特征[J]. 生态环境学报, 2020, 29(7): 1302-1309.
- [41] SARDANS J, RIVAS-UBACH A, PEÑUELAS J. Factors affecting nutrient concentration and stoichiometry of forest trees in Catalonia (NE Spain) [J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, 262: 2024-2034.
- [42] ZHANG L, WANG L, HE W, et al. Patterns of leaf N : P stoichiometry along climatic gradients in sandy region, north of China [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2018, 11(2): 218-225.
- [43] HAN W X, FANG J Y, REICH P B, et al. Biogeography and variability of eleven mineral elements in plant leaves across gradients of climate, soil and plant functional type in China [J]. *Ecology Letters*, 2011, 14: 788-796.
- [44] 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.
- [45] LOVELOCK C E, FELLER I C, BALL M C, et al. Testing the Growth Rate vs. Geochemical Hypothesis for latitudinal variation in plant nutrients [J]. *Ecology Letters*, 2007, 10: 1154-1163.
- [46] 李鹏, 零天旺, 杨章旗, 等. 不同林龄马尾松人工林叶片-土壤碳氮磷生态化学计量特征研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2023, 43(1): 88-98.
- [47] 魏晨, 张小平, 罗子渝, 等. 兰州市南山和北山3种乔木叶片生态化学计量特征的对比研究[J]. 生态学报, 2021, 41(6): 2460-2470.
- [48] 史作民, 唐敬超, 程瑞梅, 等. 植物叶片氮分配及其影响因素研究进展[J]. 生态学报, 2015, 35(18): 5909-5919.
- [49] 赵一娉, 曹扬, 陈云明, 等. 黄土丘陵沟壑区森林生态系统生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2017, 37(16): 5451-5460.
- [50] 梁国华, 吴建平, 熊鑫, 等. 鼎湖山不同演替阶段森林土壤pH值和土壤微生物量碳氮对模拟酸雨的响应[J]. 生态环境学报, 2015, 24(6): 911-918.
- [51] 葛畅, 刘慧琳, 张世文, 等. 耕作方式和土壤类型对皖北旱作农田土壤紧实度的影响[J]. 水土保持研究, 2018, 25(5): 89-94.

(责任编辑: 佟金凤)

欢迎订阅 2024 年《植物资源与环境学报》

《植物资源与环境学报》为江苏省中国科学院植物研究所和江苏省植物学会共同主办的学术刊物, 国内外公开发行。本刊为全国中文核心期刊(北大核心)、中国科技核心期刊和中国科学引文数据库核心期刊(CSCD 核心), 并为 BA(预评)、CAB、BCI、JST、中国生物学文摘、中国环境科学文摘、中国科学引文数据库、万方数据——数字化期刊群、中国学术期刊(光盘版)、超星期刊域出版平台和中文科技期刊数据库等国内外著名刊库收录。2013 年荣获“首届江苏省新闻出版政府奖·期刊奖”及江苏省精品科技期刊项目; 2015 年荣获“第六届江苏省科技期刊金马奖·精品期刊奖”; 2015 年至 2023 年均荣获江苏省精品科技期刊项目; 2021 年荣获“第三届江苏省新闻出版政府奖·期刊奖提名奖”。

本刊围绕植物资源与环境两个中心命题, 报道我国植物资源的考察、开发利用和植物物种多样性保护, 自然保护区与植物园的建设和管理, 植物在保护和美化环境中的作用, 环境对植物的影响以及与植物资源和植物环境有关学科领域的原始研究论文、研究简报和综述等。凡从事植物学、生态学、自然地理学以及农、林、园艺、医药、食品、轻化工和环境保护等领域的科研、教学、技术人员及决策者均可以从本刊获得相关学科领域的研究进展和信息。

本刊为双月刊, 大 16 开本, 每期 120 页。全国各地邮局均可订阅, 邮发代号 28-213, 每期定价 30 元, 全年定价 180 元。国内统一连续出版物号 CN 32-1339/S, 国际标准连续出版物号 ISSN 1674-7895。若错过征订时间或需补齐 1992 年至 2023 年各期, 请直接与编辑部联系邮购。1992 年至 1993 年每年 8 元; 1994 年至 2000 年每年 16 元; 2001 年至 2005 年每年 24 元; 2006 年至 2008 年每年 40 元; 2009 年至 2011 年每年 60 元; 2012 年至 2019 年每年 80 元; 2020 年至 2021 年每年 120 元; 2022 年至 2023 年每年 156 元; 2024 年全年 180 元(均含邮资, 如需挂号另付挂号费 3 元; 快递到付)。

编辑部地址: 江苏省南京市中山门外 江苏省中国科学院植物研究所内(邮编 210014); 电话: 025-84347014; QQ: 2219161478; E-mail: zwzybjb@163.com。本刊目前只接收在线投稿, 投稿网址: <http://zwzy.cnbg.net>。

欢迎您扫码关注本刊微信公众号。

