



祁连山5种典型灌丛土壤生态化学计量特征

马 剑^{1,2,3},刘贤德^{1,2,3},金 铭^{1,2,3},赵维俊^{1,2,3},敬文茂^{1,2,3},王荣新^{1,2,3}

(1 甘肃省祁连山水源涵养林研究院,甘肃张掖 734000; 2 甘肃祁连山森林生态监测与评估国际科技合作基地,甘肃张掖 734000; 3 甘肃省祁连山森林生态系统野外科学观测研究站,甘肃张掖 734000)

摘要:土壤C、N、P生态化学计量特征是体现生态系统变化过程的重要依据。该研究以分布于祁连山北麓中段的青甘锦鸡儿、鲜黄小檗、金露梅、鬼箭锦鸡儿、吉拉柳等5种典型灌丛群落为研究对象,通过野外调查采样,测定土壤有机C、N、P含量,分析了不同灌丛群落土壤C、N、P含量及其生态化学计量比的垂直分布特征,并探讨了各指标间的耦合关系,为祁连山地区土壤-植物养分关系及退化植被恢复与重建提供理论依据。结果表明:(1)祁连山北麓中段5种灌丛群落土壤有机C(45.29 g/kg)、全N(3.85 g/kg)、全P含量(0.70 g/kg)较高,均高于全国平均水平。(2)相关性分析表明,土壤有机C与全N之间呈极显著正相关($P<0.01$),但土壤有机C与全P以及全N与全P之间没有明显的相关性,且土壤C、N含量变化几乎完全同步。(3)各灌丛类型土壤有机C、全N含量均表现为表层高于下层,而全P含量土层间差异不显著;各灌丛群落土壤有机C、全N含量均随土层加深呈现“倒金字塔”的分布格局,但不同灌丛类型全P含量随土层加深的变化规律却一致,且土层对全P含量的影响不显著。(4)5种灌丛群落土壤整体C:N:C:P:N:P(11.29、66.99、5.67)均低于全国平均水平,各灌丛群落土壤C:P、N:P随土层加深均呈不同程度的下降趋势,但不同灌丛群落土壤C:N随土层加深的变化规律有所不同。(5)土壤有机C、全N与C:N、C:P、N:P之间均具有极显著的二次函数关系($P<0.01$),土壤全P与C:N、C:P、N:P之间关系不显著。研究认为,祁连山北麓中段土壤C:N和P含量的稳定性较高(CV=3.99%和2.66%),C:P、N:P是判断研究区限制性养分的重要指标,祁连山北麓中段灌丛群落土壤主要受N素的限制。

关键词:土壤化学计量特征;典型灌丛;土层深度;祁连山

中图分类号:Q948.113; S714.5 文献标志码:A

Soil Ecological Stoichiometry of Five Typical Shrubs in Qilian Mountain

MA Jian^{1,2,3}, LIU Xiande^{1,2,3}, JIN Ming^{1,2,3}, ZHAO Weijun^{1,2,3},
JING Wenmao^{1,2,3}, WANG Rongxin^{1,2,3}

(1 Academy of Water Resources Conservation Forests in Qilian Mountains of Gansu Province, Zhangye, Gansu 734000, China;
2 International Science and Technology Cooperation Base for Forest Ecological Monitoring and Assessment in Qilian Mountain, Gansu Province, Zhangye, Gansu 734000, China; 3 Gansu Qilian Mountain Forest Ecosystem Observation and Research Station, Zhangye, Gansu 734000, China)

Abstract: The ecological stoichiometric of soil carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) is an important basis to reflect the process of ecosystem change. This study selected *Caragana tangutica*, *Berberis diaphana*, *Potentilla fruticosa*, *Caragana jubata* and *Salix gilashanica* which lived in northern piedmont of the central Qilian Mountain as object, to determine the contents of soil C, N and P by field investigation and sampling, analyze the vertical distribution characteristics of soil C, N and P contents and their ecologi-

收稿日期:2021-04-16;修改稿收到日期:2021-07-08

基金项目:甘肃省自然科学基金(20JR5RE641);国家重点研发计划(2019YFC0507404);国家社科基金(19BGL193);国家自然科学基金(41871092)

作者简介:马 剑(1986—),男,高级工程师,从事森林与土壤生态研究工作。E-mail:405153416@qq.com

cal stoichiometry in different shrub communities, and discuss the coupling relationship among the indexes. It could provide a theoretical basis for the relationship between soil and plant nutrients and the restoration and reconstruction of degraded vegetation in Qilian Mountain. The results showed that: (1) the mean contents of soil C, N and P were 45.29, 3.85, 0.70 g/kg, respectively, which were higher than the national average levels. (2) According to the correlation analysis, soil C and N presented extremely significant positive correlation ($P < 0.01$), but there was no significant correlation between soil C and P or between soil N and P. Furthermore, C and N showed almost synchronous variation. (3) The contents of soil C and N in the surface layer were higher than those in the lower layer, while there was no significant difference in soil P between soil layers in all shrub types. The contents of soil C and N showed an inverted pyramid distribution pattern with the deepening of soil layer in different shrub types, but the changes of soil P were not consistent with the deepening of soil layer in different shrub types, and the effect of soil layer on soil P was not significant. (4) The mean soil C : N, C : P and N : P ratios were 11.29, 66.99 and 5.67, respectively, which were all below the national level. The soil C : P and N : P showed a decreasing trend with the deepening of soil layer to different degrees in all shrub types, but the change rule of soil C : N was different with the deepening of soil layer in all shrub types. (5) Soil C, N and C : N, C : P, N : P had extremely significant quadratic function relationship ($P < 0.01$), but the relationship between soil P and C : N, C : P, N : P was not significant. According to the research, the soil C : N and P content have high stability (3.99% and 2.66%), whereas the C : P and N : P are important indicators for determining nutrient limitation. The soil of shrub community is mainly restricted by N element in northern piedmont of the central Qilian Mountain.

Key words: soil stoichiometry; typical shrubs; soil depth; Qilian Mountain

生态化学计量学是研究生态系统各组分主要组成元素平衡关系和耦合关系的重要方法^[1-2], 被广泛应用于植物种群动态、个体生长、群落演替、限制性元素判别、生态系统稳定性等研究领域^[3]。土壤作为陆地生态系统极其重要的组成单元, 是生态系统许多生态过程的载体^[4], 在植物生长中发挥着关键作用, 直接影响着植物群落的组成、稳定和演替^[5]。土壤C、N、P是土壤养分重要的组成部分, 是植物赖以生存的重要环境条件^[6]。土壤C、N、P含量的稳定及其生态化学计量特征直接影响着土壤肥力和植物生产力^[7]。因此, 研究土壤养分生态化学计量特征, 不仅可以了解土壤质量状况、揭示土壤养分之间的耦合关系, 还可以揭示养分的可获得性, 对于认识C、N、P的循环、平衡机制及其对植物群落结构和功能的影响均具有重要意义^[8-9]。近年来, 生态化学计量学在国内外的发展较为迅速, 已有的研究不仅涉及森林、荒漠、草原等生态系统中的不同植被类型、不同植物器官以及土壤等的化学计量特征, 而且还涉及植物营养器官养分含量及其与环境因子之间的关系等^[10-12]。然而对灌丛生态系统土壤化学计量特征的关注较少, 对灌丛的研究多关注于森林生态系统中的灌木层和荒漠地区的旱生灌木^[13-14], 尤其缺乏高寒山区灌丛生态系统土壤生态化学计量特征的研究, 研究灌丛生态系统土壤生态化学计量特征

对灌丛植被的可持续经营和保护具有重要的指导意义。

祁连山是中国西部重要的生态安全屏障, 是黄河流域重要水源产流地, 也是中国生物多样性保护优先区域。灌丛群落作为祁连山森林生态系统的的主要组成部分, 对祁连山森林系统保护水土、涵养水源以及维持河西走廊生态系统和保护中国生物多样性起着极为重要的作用^[15]。但在气候变化和人类活动干扰的影响下, 灌丛生态系统破坏及退化状况较为严重, 生态服务功能降低, 对区域生态建设和经济社会发展产生了负面影响, 如何恢复和重建受损的灌丛生态系统, 对于合理调控植被恢复具有重要的科学意义。土壤碳、氮、磷化学计量特征能够广泛地反映群落的生态动态过程, 土壤养分状况与植被恢复密切相关, 研究土壤-植物相互作用与碳、氮、磷循环的耦合关系, 对进一步认识和保护灌丛生态系统具有重要指导意义。然而, 祁连山地区灌丛群落土壤化学计量特征的研究相对滞后, 这在一定程度上限制了土壤-植物分布关系和养分循环的动态研究。鉴于此, 本研究选择分布于祁连山北麓中段典型流域——大野口流域不同垂直植被带上的甘青锦鸡儿(*Caragana tangutica*)、鲜黄小檗(*Berberis diaphana*)、金露梅(*Potentilla fruticosa*)、鬼箭锦鸡儿(*Caragana jubata*)和吉拉柳(*Salix gilashani-*

ca)等5种典型灌丛群落为研究对象,通过野外样地调查及采样,分析了5种典型灌丛群落土壤C、N、P含量及其生态化学计量垂直分布特征,并探究了土壤养分含量与其生态化学计量特征之间的耦合关系,以期为祁连山地区土壤-植物养分关系及退化植被恢复与重建提供理论依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

祁连山位于青藏高原、蒙古高原和黄土高原的交界处,是黑河、疏勒河和石羊河的水源地,对区域生态安全和经济社会可持续发展有着重要意义^[16]。祁连山区作为典型的高寒半干旱山区,具有海拔跨度大(1 700~5 800 m)、水热梯度显著以及对气候变化响应敏感等特点^[17-18]。独特的生态环境以及较少的人为干扰,使得该区成为研究山区植被生态化学计量特征的理想区域。

大野口流域位于祁连山北麓中段的西水林区,中心位置100°15'E,38°31'N,流域总面积73.32 km²,流域海拔为2 590~4 645 m^[19]。年平均气温-0.6~2.0 °C,年均日照时数1 893 h,日辐射总量均值为110.28 KW·m⁻²,年均降水量为433.6 mm,年均蒸发量为1 081.7 mm,年均相对湿度为60%,属高寒半干旱山地森林草原气候^[20]。植被类型主要有森林草原带、森林灌丛带、亚高山灌丛草甸带、高山草甸带;土壤类型主要有山地灰钙土、山地栗钙土、山地灰褐土、亚高山灌丛草甸土、高山寒漠土。其中山地灰褐土是乔木林生长的主要地带,海拔高度为2 400~3 300 m;亚高山灌丛草甸土是湿性灌木林生长的主要地带,主要分布在3 300~4 000 m。青海云杉作为建群树种,呈斑块状或条状

分布于海拔2 400~3 300 m阴坡和半阴坡,与阳坡草地交错分布;灌木优势种有金露梅(*Potentilla fruticosa*)、鬼箭锦鸡儿(*Caragana jubata*)、吉拉柳(*Salix gilashanica*)等;草本主要有珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)、黑穗苔(*Carex atrata*)和针茅(*Stipa* sp.)等^[21]。

1.2 样地设置

基于典型性和代表性原则,选择甘青锦鸡儿、鲜黄小檗、金露梅、鬼箭锦鸡儿、吉拉柳等5种典型灌丛进行野外试验。依据植被调查中比较常用的典型样地法^[22],在每种灌丛类型内建立3个面积为20 m×20 m的调查样地,由于甘青锦鸡儿群落密度相对较小,为了调查及取样更加合理,该灌丛样地面积设置为30 m×30 m,共设置15个样地,调查记录每个样地内植物的名称、高度、株数、冠幅、地径、盖度等,样地情况见表1。

1.3 样品采集与分析

于2019年8月中旬采集土壤样品,在上述样地内的灌丛边缘(东、西、南、北4个方向)采集土壤样品,采样深度为0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~60 cm,共5层。将同一土层多点收集的土壤样品剔除动植物残体、石砾等杂质,混合均匀,装入样品袋带回实验室,经四分法取约1 kg土样,风干,过0.149 m的土壤筛测定土壤有机C、N、P含量。土壤有机C含量采用重铬酸钾外加热法测定,全N含量采用凯氏定氮法测定,土壤全P采用钼锑抗比色法测定^[23]。

1.4 数据分析

利用Excel 2010对野外调查和室内分析的数据进行整理及初步分析,然后采用SAS 9.2中的一般线性模型(General Linear Model,GLM)分析检验

表1 祁连山北麓典型灌丛群落样地基本情况

Table 1 Basic information of sampling plots of typical shrub community in Qilian Mountain

| 植被类型 Vegetation type | 土层厚度 Soil depth /cm | 土壤类型 Soil types | 海拔 Altitude /m | 坡度 Slope/° | 坡向 Aspect/° | 生长状况 Growth status | 地径 Ground diameter /mm | 盖度 Coverage /% | 平均高度 Average height/m |
|---------------------------------|------------------------|--------------------|-------------------|---------------|----------------|-----------------------|---------------------------|-------------------|--------------------------|
| 鬼箭锦鸡儿 <i>Caragana jubata</i> | 60 | A | 3 300 | 40 | NE | — | 20 | 60 | 0.60 |
| 吉拉柳 <i>Salix gilashanica</i> | 60 | A | 3 300 | 32 | NE | + | 26 | 55 | 1.40 |
| 金露梅 <i>Potentilla fruticosa</i> | 60 | A | 2 900 | 33 | E | ++ | 16 | 90 | 0.90 |
| 鲜黄小檗 <i>Berberis diaphana</i> | 60 | B | 2 600 | 30 | W | — | 20 | 70 | 1.80 |
| 甘青锦鸡儿 <i>Caragana tangutica</i> | 60 | B | 2 600 | 22 | SW | — | 25 | 50 | 1.40 |

注:A. 高山草甸土;B. 栗钙土;-.一般;+.良好;++.好

Notes: A. Alpine meadow soil; B. Chestnut soil; -. General; +. Good; ++. Excellent

不同灌丛、不同土层间各指标的差异显著性,多重比较用新复极差法(Duncan),显著性水平设为0.05。并选择线性函数、二次函数等函数模型对15个样地土壤C、N、P含量及其化学计量比进行最优拟合。所有数据表示为均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 不同灌丛群落土壤生态化学计量特征

5种典型灌丛群落0~60 cm土层C、N、P含量均值分别为(45.29 ± 6.42) g/kg、(3.85 ± 0.67) g/kg、(0.70 ± 0.02) g/kg,土壤C:N、C:P、N:P均值分别为(11.29 ± 0.45)、(66.99 ± 9.89)、(5.67 ± 1.00) (表2)。6个指标变异系数范围为2.86%~17.64%,均属于弱变异($CV < 25\%$),其中土壤N:P的变异系数最高为17.64%,土壤全P的变异系数最小,仅为2.86%。不同灌丛类型间土壤化学计量特征差异显著($P < 0.05$)。吉拉柳群落C、N含量最高,且与其他灌丛群落差异显著($P < 0.05$),甘青锦鸡儿群落最低;土壤P含量以金露梅群落最高,且显著高于其他群落($P < 0.05$),鬼箭锦鸡儿群落最低。土壤C:P和N:P均以吉拉柳群落最高,分别为(111.29 ± 7.91)和(9.07 ± 0.01),均以甘青锦鸡儿最低,分别为(17.42 ± 2.13)和(2.40 ± 0.05)。不同植被类型对土壤C:P的影响显著($P < 0.05$);除鲜黄小檗和金露梅外,不同植被类型对土壤N:P影响显著($P < 0.05$);而不同植被类型对土壤C:N影响相对小,鬼箭锦鸡儿群落土壤C:N最高,为(13.28 ± 0.85),但与金露梅和吉拉柳群落差异不显著,甘青锦鸡儿群落土壤C:N最

低,为(7.23 ± 0.70),与其他灌丛群落差异显著($P < 0.05$)。

2.2 不同灌丛群落土壤生态化学计量比垂直分布特征

5种典型灌丛群落土壤碳氮磷垂直分布特征如图1所示。由图1可知,土壤有机C、全N含量随土层加深呈逐渐降低趋势;从垂直分布来看,0~10 cm土层,不同植被类型对土壤有机C和全N的影响存在差异,金露梅群落与吉拉柳群落土壤有机C、全N含量之间差异不显著,但其他群落之间差异显著($P < 0.05$);金露梅群落土壤有机C含量高于其他群落,而吉拉柳群落土壤全N含量高于其他群落,其中表层土壤有机C、全N含量最高,分别为81.56 g/kg、6.80 g/kg,甘青锦鸡儿最低,分别为17.50 g/kg、2.03 g/kg。对5种灌丛群落来说,同一灌丛类型不同土层间土壤全P差异不显著,且不同灌丛群落从上到下呈现了不同的分布规律。甘青锦鸡儿群落土壤全P含量随土层加深呈先减小后增大再减小的趋势,鲜黄小檗和吉拉柳群落土壤全P含量随土层加深呈先减小后增大的趋势,金露梅和鬼箭锦鸡儿群落土壤全P含量随土层加深变化较小。对比分析同一土层不同灌丛群落的土壤全P含量,发现金露梅群落土壤全P含量显著高于其他灌丛群落($P < 0.05$),而其余4种灌丛群落之间差异未达到显著水平。

5种典型灌丛群落土壤化学计量比垂直分布特征如图2所示。由图2可以看出,土壤C:N随土层加深的变化规律存在差异,甘青锦鸡儿群落0~10 cm土层C:N最高,鲜黄小檗和鬼箭锦鸡儿群落

表2 祁连山北麓5种典型灌丛群落土壤化学计量特征

Table 2 Soil stoichiometry of five typical shrub communities in northern piedmont of Qilian Mountain

| 灌丛类型 Shrub type | 有机C Organic carbon (g·kg ⁻¹) | 全N Total nitrogen (g·kg ⁻¹) | 全P Total phosphorus (g·kg ⁻¹) | C:N | C:P | N:P |
|---------------------------------|--|---|---|--------------------|---------------------|-------------------|
| 甘青锦鸡儿 <i>Caragana tangutica</i> | 13.74 ± 2.45 d | 1.88 ± 0.15 d | 0.78 ± 0.05 b | 7.23 ± 0.70 c | 17.42 ± 2.13 e | 2.40 ± 0.05 d |
| 鲜黄小檗 <i>Berberis diaphana</i> | 34.71 ± 5.04 d | 3.38 ± 0.20 c | 0.66 ± 0.05 c | 10.36 ± 0.85 b | 53.24 ± 4.09 d | 5.22 ± 0.12 c |
| 金露梅 <i>Potentilla fruticosa</i> | 62.05 ± 8.60 b | 4.79 ± 0.29 b | 0.91 ± 0.07 a | 13.27 ± 1.02 a | 67.99 ± 4.42 c | 5.26 ± 0.15 c |
| 鬼箭锦鸡儿 <i>Caragana jubata</i> | 41.02 ± 5.34 c | 3.09 ± 0.21 c | 0.48 ± 0.03 d | 13.28 ± 0.85 a | 85.03 ± 5.84 b | 6.42 ± 0.04 b |
| 吉拉柳 <i>Salix gilashanica</i> | 74.93 ± 10.81 a | 6.10 ± 0.46 a | 0.68 ± 0.05 c | 12.29 ± 0.86 a | 111.29 ± 7.91 a | 9.07 ± 0.01 a |
| 平均值 Mean | 45.29±6.42 | 3.85±0.67 | 0.70±0.02 | 11.29±0.45 | 66.99±9.89 | 5.67±1.00 |
| 变异系数 Coefficient of variation% | 14.18 | 17.40 | 2.86 | 3.99 | 14.76 | 17.64 |

注:0~60 cm土壤C、N、P含量为5个土层的平均值,不同小写字母表示不同灌丛间差异显著($P < 0.05$)

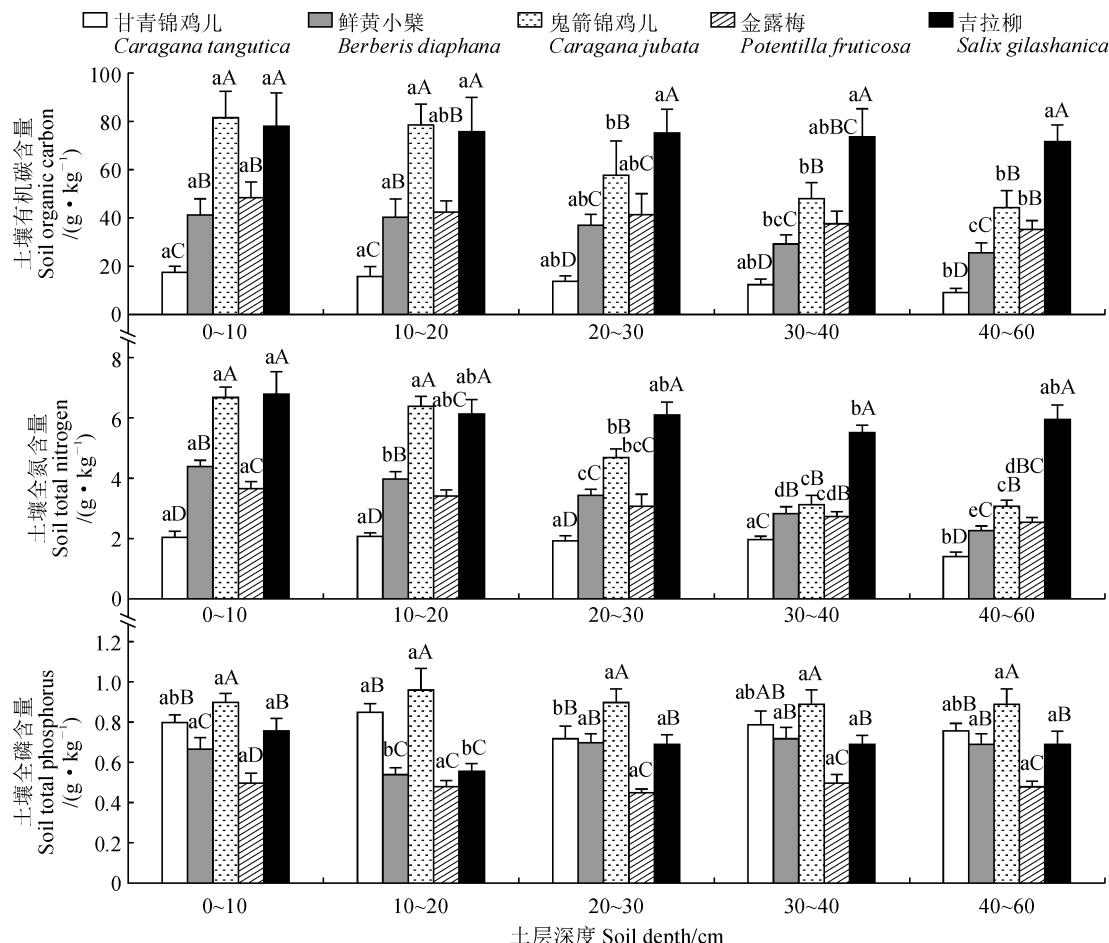
Note: The contents of C, N and P in 0~60 cm soil were the average value of five soil layers, and different normal letters indicated significant differences among different shrubs ($P < 0.05$)

40~60 cm 土层 C:N 最高,金露梅和吉拉柳群落 30~40 cm 土层 C:N 最高,其值变化范围为 6.33~15.34。不同灌丛群落土壤 C:P 随土层加深呈现了不同的变化规律,甘青锦鸡儿、金露梅和鬼箭锦鸡儿群落 0~10 cm 土层 C:P 最高,鲜黄小檗和吉拉柳群落 10~20 cm 土层 C:P 均最高,其值变化范围为 12.02~108.83。不同灌丛类型土壤 N:P 随土层加深的变化规律亦不同,随土层加深,甘青锦鸡儿、鲜黄小檗和吉拉柳群落土壤 N:P 整体上呈先增大后减小趋势,金露梅和鬼箭锦鸡儿群落土壤 N:P 逐渐减小,其值变化范围 1.84~10.94;土壤 C:P、N:P 垂直递减速率较土壤 C:N 快。

2.3 典型灌丛群落土壤生态化学计量特征间的关系

由表 3 可以看出,土壤有机 C 与全 N 之间具有

极显著的线性函数关系($P<0.01$),土壤全 N 含量随有机 C 含量的增大显著增大;但土壤有机 C 与全 P 以及土壤全 N 与全 P 之间关系均不显著,相关系数较小。土壤 C:N 与土壤 C:P、N:P 均呈极显著二次函数关系($P<0.01$),土壤 C:P 与土壤 N:P 呈极显著线性函数关系($P<0.01$),相关系数较高。土壤化学计量比与土壤有机 C、全 N 之间均呈极显著的二次函数关系($P<0.01$),但与土壤全 P 没有明显的关系。另外,不同土壤生态化学计量比的主控因素有所不同,土壤 C:N 与有机 C 含量拟合模型的 R^2 (0.83)高于 N 含量(0.69),故土壤有机 C 对土壤 C:N 影响更大;土壤 C:P 与有机 C 含量拟合模型的 R^2 (0.80)高于 P 含量(0.13),故土壤 C:P 主要受土壤有机 C 含量影响;土壤 N:P 主



不同小写字母表示同一灌丛类型不同土层间差异显著,不同大写字母表示同一土层不同灌丛间差异显著($P<0.05$),下同

图 1 祁连山北麓不同灌丛群落类型土壤有机碳、全氮、全磷的垂直分布变化

Different normal letters indicated that there were significant differences among different soil layers of the same shrub, and different uppercase letters indicated that there were significant differences among different shrubs of the same soil layer ($P<0.05$). The same as below

Fig. 1 Vertical distribution of soil organic carbon, total nitrogen and total phosphorus of different shrub types in northern piedmont of Qilian Mountain

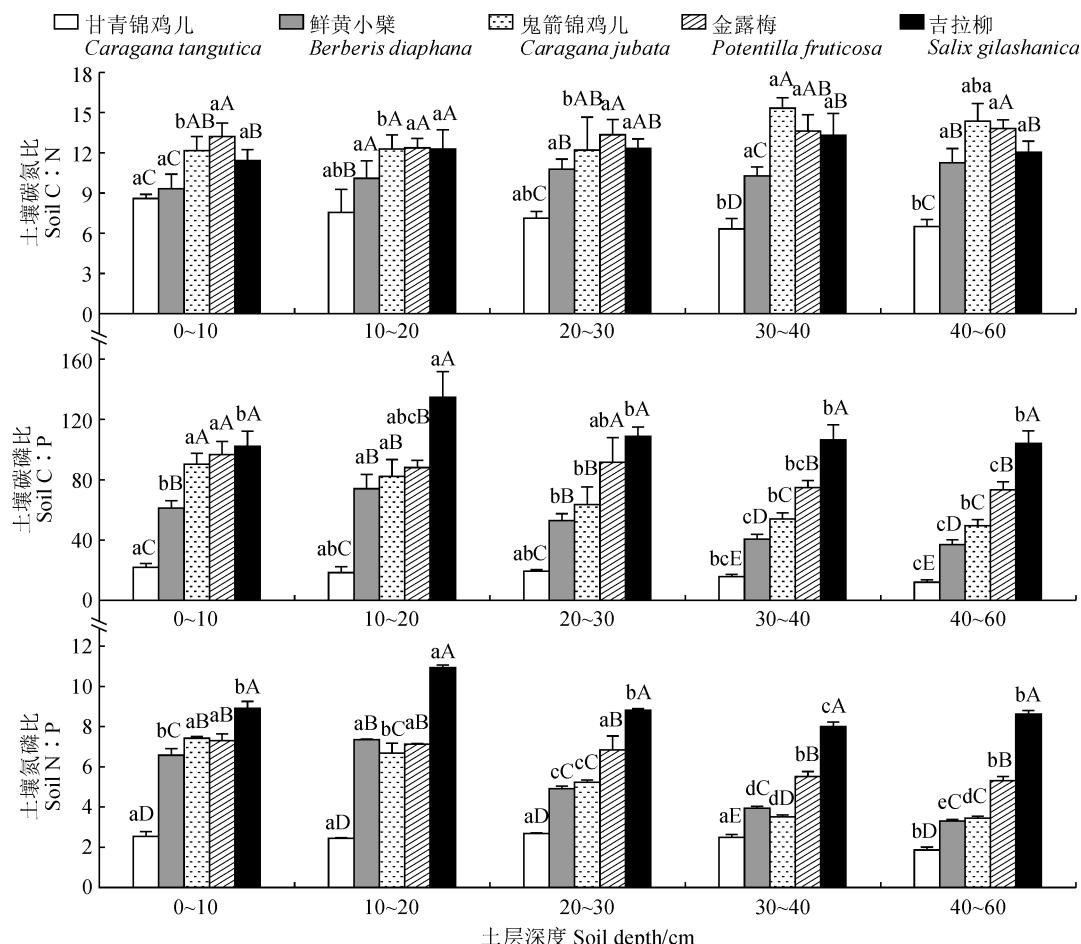


图2 祁连山北麓不同灌丛群落类型土壤化学计量特征的垂直分布变化

Fig. 2 Vertical distribution of soil stoichiometric characteristics of different shrub types in northern piedmont of Qilian Mountain

表3 祁连山北麓典型灌丛群落化学计量特征之间的关系

Table 3 Relationship among soil stoichiometric of typical shrub communities in northern piedmont of Qilian Mountain

| 指标 Index | 关系式 Relation | R^2 | P |
|-------------|--|--------|---------|
| C-N | $y = 0.0620x + 0.9030$ | 0.9518 | <0.0001 |
| C-P | $y = 0.0001x^2 - 0.0092 + 0.8401$ | 0.1586 | 0.3549 |
| N-P | $y = 0.0099x^2 - 0.0615 + 0.7721$ | 0.0553 | 0.7107 |
| C : N-C : P | $y = -1.2533x^2 + 37.0370 - 184.1910$ | 0.7074 | 0.0006 |
| C : N-N : P | $y = -0.1525x^2 + 3.8104x - 17.0348$ | 0.6050 | 0.0038 |
| C : P-N : P | $y = 0.0661x + 1.2449$ | 0.9449 | <0.0001 |
| C-C : N | $y = -0.0022x^2 + 0.2898x + 3.7106$ | 0.8330 | <0.0001 |
| C-C : P | $y = -0.0104x^2 + 2.2311x - 7.4953$ | 0.7960 | <0.0001 |
| C-N : P | $y = -0.0006x^2 + 0.1386x + 0.9681$ | 0.7101 | 0.0006 |
| N-C : N | $y = -0.5748x^2 + 5.7701x - 1.1516$ | 0.6866 | 0.0009 |
| N-C : P | $y = -1.5913x^2 + 30.9419x - 25.0424$ | 0.7102 | 0.0006 |
| N-N : P | $y = -0.0611x^2 + 1.7222x + 0.0823$ | 0.7063 | 0.0006 |
| P-C : N | $y = 56.4208x^2 - 81.2478x + 39.2998$ | 0.3458 | 0.0784 |
| P-C : P | $y = 207.3451x^2 - 361.8889x + 214.4471$ | 0.1326 | 0.4258 |
| P-N : P | $y = -0.9664x^2 - 4.0720x + 9.0343$ | 0.1378 | 0.4109 |

要受土壤N含量的影响($R^2=0.71$),土壤P含量的影响比较弱($R^2=0.14$)。土壤C、N、P化学计量比中,土壤C:P、N:P的变异系数较大(14.76、17.64),但与土壤有机C、N含量均有着极为显著的二次函数关系。由此可见,祁连山灌丛群落土壤有机C和全N与其化学计量特征之间有着较为复杂的非线性关系。

3 讨 论

研究表明,由于灌丛群落建群种及其伴生种的差异,造成了不同灌丛群落间土壤养分化学计量特征的差异^[1]。本研究也得出了与其相似的研究结果,由于5种灌丛群落的优势种及其伴生物种不同,各群落的丰富度和多样性不同,导致不同灌丛群落生物量、凋落物组成及其分解速率等存在差别,从而使得5种灌丛群落土壤化学计量特征存在差异。另外,由于不同灌丛群落根系的分布深度存在差异,对土壤中养分的吸收不同,进而对土壤养分垂直分布的影响程度也不一样。通过研究发现,祁连山北麓中段灌丛群落C、N、P含量(45.29、3.85、0.70 g/kg)高于全国平均水平(11.12、1.06、0.65 g/kg),说明祁连山地区良好的水热组合条件更加有利于灌丛群落中营养物质的积累,故而土灌丛群落土壤C、N、P含量较为丰富。参照全国第二次土壤普查养分分级标准^[24],祁连山北麓中段灌丛群落土壤C、N含量均为一级水平;而P含量相对较低,为三级水平,且显著低于全球平均水平(2.8 g/kg),这与中国土壤P含量低于全球平均水平的研究结论一致^[25-26]。

本研究中5种灌丛群落土壤有机C、全N含量随土层加深呈现了“倒金字塔”的分布格局,这与前人的研究结果一致^[25]。其原因为土壤有机C和N主要来自于凋落物的归还,凋落物被分解后首先在表层聚集,然后随着水或者其他介质往下扩散迁移,再加上土壤微生物、动物的影响及植物根系的吸收,从而导致土壤有机C、全N含量随土层加深呈现了由高到低的垂直分布格局,建议在祁连山植被保护与修复工作中,尽量保护好灌木林下的植被,从而提高灌木林的土壤肥力。5种灌丛群落全P含量在不同土层的变化幅度较小,这是因为土壤P是一种沉积性物质,受成土母质的影响,主要来源于岩石分化且不利于迁移^[26],再加上研究区灌丛土壤类型为栗钙土和高山草甸土,铝、铁氧化物的含量比较高,对P有固定作用,降低了P的有效性,影响了P循环,故而P在各土层的差别较小^[27],这也说明植被类型

是造成表层土壤全P含量差异较大的主要因子^[28]。土壤中的C、N、P元素是植物生长所必需的营养元素,在植物生长过程中起着重要作用,其含量和组成均受植被类型和外部环境的影响^[29-30]。本研究中表层0~10 cm,除金露梅与吉拉柳群落外,其他群落之间土壤有机C和全N含量差异显著($P<0.05$),说明不同灌丛群落因植被形态结构、凋落物和分泌物不同,导致土壤养分含量也存在显著的差异。相关分析发现,灌丛群落土壤有机C与全P以及土壤全N与全P之间没有明显的显著关系($R^2=0.16$ 、0.05),而土壤有机C与全N的 R^2 高达0.95,表明土壤中C、N含量对植被类型和外界因子的响应步调一致;不同灌丛类型土壤C:N较为稳定,变异系数较低(3.99)。土壤C:N是衡量土壤有机质分解矿化速率的重要指标^[31],本研究中5种典型灌丛群落土壤整体C:N(11.29)略低于全国平均水平(12.3)^[32],表明土壤C比N更缺乏。研究发现,土壤有机质C:N与其分解矿化速率呈反比,故而较低的土壤C:N表明研究区灌丛群落土壤具有较高的土壤C源、有机质分解、矿化速率^[33]。土壤C:P反映了土壤P的矿化能力,低C:P有利于微生物分解有机质,释放养分,增加土壤中的有效P,而高C:P会导致微生物与植物争夺土壤中的无机P,不利于植物生长^[34]。5种典型灌丛群落土壤C:P(66.99)远低于全国平均水平(136)^[32],表明研究区灌丛群落中土壤P为净矿化,土壤P的有效性较高,有利于灌丛植被的生长。土壤N:P作为诊断N饱和的指标,常被用于判断养分限制的阈值^[35]。本研究中5种典型灌丛群落土壤C:N(5.67)低于全国平均水平(9.30)^[32],这可能与祁连山区降雨量较大,淋溶作用导致土壤中P积累量较小有关;研究表明,N:P<10时受N限制,N:P>20时受P限制,10<N:P<20时受N和P共同限制^[36],本研究5种灌丛群落土壤N:P(2.40~9.07)均小于10,说明祁连山北麓中段灌丛群落土壤受N素的限制,这与赵维俊等^[19]、张光德等^[37]的研究结果一致。

祁连山北麓中段5种灌丛群落土壤C:N在土壤剖面上较为稳定,与王维奇等^[30]、朱秋莲等^[33]的研究结果相似,这是因为C、N作为重要的结构性成分,在消耗和积累过程中有着相对固定的比值,对环境变化的响应几乎同步^[38],同时这也符合化学计量学的基本原则,即有机质的形成需要一定量的N和其他养分与其相对固定比率的C^[39];不同灌丛类型

土壤 C:N 随土层加深呈现了不一致的变化规律,这是因为通常情况下土壤 C:N 受气候、土壤、植被等因素的影响,随土层深度增加,气温、降水、植被因子的影响力减弱,土壤因子的影响力增强^[40]。此外,由于不同植被类型土壤有机 C 和 N 的垂直分布差异显著,植被变化也会影响土壤 C:N 的垂直分布,进而使得 C:N 随土层深度的变化呈现复杂的变化规律;土壤 C:P,N:P 随土层加深呈现了不同程度的下降趋势,植被类型的差异导致土壤 C:P,N:P 也有所不同,是因为不同植物对大气、土壤中主要元素的吸收和释放不同,从而造成了不同植被类型下土壤 C:P 和 N:P 的差异^[41]。由此可以断定土壤 C:P 和 N:P 可用来反映祁连山北麓区域 P 素的有效性以及判断养分的限制性,其化学计量比大小可预测该地区土壤-植被群落生态系统结构和稳定性的演化趋势。

4 结 论

本研究通过分析祁连山大野口流域 5 典型灌丛土壤 C,N,P 含量及其生态化学计量特征,探讨了土壤养分含量与其生态化学计量特征之间的耦合关系,主要结论如下:

(1) 5 种灌丛群落土壤有机 C、全 N 含量随土层加深呈现了“倒金字塔”的分布格局,而全 P 含量随土层加深变化规律不一致。因此,应加强对祁连山灌木林下植被的保护,从而促进林下枯落物的分解,提高灌木林养分循环能力,维持灌木林长期生产力。

(2) 土壤 C:P,N:P 可用来评价研究区磷的有效性和养分限制性,进一步分析表明祁连山北麓中段灌丛群落土壤主要受 N 素的限制。因而,在祁连山灌木林的经营管理中,应注重土壤中氮肥的补充。

参考文献:

- [1] 康扬眉, 马凯博, 黄菊莹, 等. 氮磷供给对荒漠草原土壤和白草 C:N:P 化学计量特征的影响[J]. 西北植物学报, 2018, 38(8): 1 507-1 516.
- [2] KANG Y M, MA K B, HUANG J Y, et al. Effects of N and P supply on the C:N:P stoichiometry in both soil and a desert steppe species *Pennisetum centrasianicum*[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalis Sinica*, 2018, 38(8): 1 507-1 516.
- [3] GÜSEWELL S. N:P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance[J]. *New Phytologist*, 2004, 164(2): 243-266.
- [4] 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.
- [5] HE J S, HAN X G. Ecological stoichiometry: Searching for unifying principles from individuals to ecosystems[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(1): 2-6.
- [6] 盛茂银, 刘洋, 熊康宁. 中国南方喀斯特石漠化演替过程中土壤理化性质的响应[J]. 生态学报, 2013, 33(19): 6 303-6 313.
- [7] SHENG M Y, LIU Y, XIONG K N. Response of soil physical-chemical properties to rocky desertification succession in South China Karst[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(19): 6 303-6 313.
- [8] ZHENG Z X, WANG K L, LIU X L, et al. Stoichiometric characteristics of plants, litter and soils in karst plant communities of northwest Guangxi[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(7): 682-693.
- [9] ZECHMEISTER-BOLTENSTERN S, KEIBLINGER K M, MOOSHAMMER M, et al. The application of ecological stoichiometry to plant-microbial-soil organic matter transforma-
- [10] WANG L J, WANG P, SHENG M Y. Stoichiometric characteristics of soil nutrient elements and its influencing factors in typical karst rocky desertification ecosystems, Southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(18): 6 580-6 593.
- [11] 张继辉, 蔡道雄, 卢立华, 等. 不同林龄柚木人工林土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2020, 40(16): 5 718-5 728.
- [12] ZHANG J H, CAI D X, LU L H, et al. Soil ecological stoichiometry of different aged Teak (*Tectona grandis*) plantations[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(16): 5 718-5 728.
- [13] 张增可, 吴雅华, 黄柳菁, 等. 海岛森林不同演替阶段土壤和植物的碳、氮、磷化学计量特征[J]. 西北植物学报, 2019, 39(5): 925-934.
- [14] ZHANG Z K, WU Y H, HUANG L J, et al. C, N and P stoichiometry of soil and plant in different forest successional stages in island[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalis Sinica*, 2019, 39(5): 925-934.
- [15] 曾昭霞, 王克林, 刘孝利, 等. 桂西北喀斯特森林植物-凋落物-土壤生态化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2015, 39(7): 682-693.
- [16] ZENG Z X, WANG K L, LIU X L, et al. Stoichiometric characteristics of plants, litter and soils in karst plant communities of northwest Guangxi[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(7): 682-693.
- [17] ZECHMEISTER-BOLTENSTERN S, KEIBLINGER K M, MOOSHAMMER M, et al. The application of ecological stoichiometry to plant-microbial-soil organic matter transforma-

- tions[J]. *Ecological Monographs*, 2015, **85**(2): 133-155.
- [10] 仇 瑶, 常顺利, 张毓涛, 等. 天山林区六种灌木生物量的建模及其器官分配的适应性[J]. 生态学报, 2015, **35**(23): 7 842-7 851.
- QIU Y, CHANG S L, ZHANG Y T, et al. Biomass estimation modeling and adaptability analysis of organ allocation in six common shrub species in Tianshan Mountains forests, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(23): 7 842-7 851.
- [11] 王晶苑, 王绍强, 李幼兰, 等. 中国四种森林类型主要优势植物的C:N:P化学计量学特征[J]. 植物生态学报, 2011, **35**(6): 587-595.
- WANG J Y, WANG S Q, LI R L, et al. C:N:P stoichiometric characteristics of four forest types' dominant tree species in China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, **35**(6): 587-595.
- [12] HAO H M, LU R, LIU Y, et al. Effects of shrub patch size succession on plant diversity and soil water content in the water-wind erosion crisscross region on the Loess Plateau[J]. *Catena*, 2016, **144**: 177-183.
- [13] 董 雪, 辛智鸣, 黄雅茹, 等. 乌兰布和沙漠典型灌木群落土壤化学计量特征[J]. 生态学报, 2019, **39**(17): 6 247-6 256.
- DONG X, XIN Z M, HUANG Y R, et al. Soil stoichiometry in typical shrub communities in the Ulan Buh Desert[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(17): 6 247-6 256.
- [14] 杨文高, 字洪标, 陈科宇, 等. 青海森林生态系统中灌木层和土壤生态化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2019, **43**(4): 352-364.
- YANG W G, ZI H B, CHEN K Y, et al. Ecological stoichiometric characteristics of shrubs and soils in different forest types in Qinghai, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2019, **43**(4): 352-364.
- [15] 王学福. 灌木林在祁连山区的作用及其发展策略研究[J]. 甘肃林业科技, 2005, **30**(2): 32-35.
- WANG X F. The importance of shrub in Qilian Mountain and its protection and development countermeasures [J]. *Journal of Gansu Forestry Science and Technology*, 2005, **30**(2): 32-35.
- [16] 周立华, 魏 轩, 黄 岚. 西北内陆河流域水资源管理利用的经验与启示[J]. 国土资源情报, 2017, (12): 3-8.
- ZHOU L H, WEI X, HUANG S. Experience and enlightenment of water resource management and utilization in inland river basin of Northwest China[J]. *Land and Resources Information*, 2017, (12): 3-8.
- [17] 王金叶, 常学向, 葛双兰, 等. 祁连山(北坡)水热状况与植被垂直分布[J]. 西北林学院学报, 2001, (S1): 1-3.
- WANG J Y, CHANG X X, GE S L, et al. Vertical distribution of the vegetation and water and heat conditions of Qilian Mountain (northern slope)[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2001, (S1): 1-3.
- [18] YANG L S, FENG Q, YIN Z L, et al. Identifying separate impacts of climate and land use/cover change on hydrological processes in upper stream of Heihe River, northwest China [J]. *Hydrological Processes*, 2017, **31**(5): 1 100-1 112.
- [19] 赵维俊, 敬文茂, 赵永宏, 等. 祁连山大野口流域典型灌丛植物与土壤中氮磷的化学计量特征[J]. 土壤, 2017, **49**(3): 572-579.
- ZHAO W J, JING W M, ZHAO Y H, et al. Nitrogen and phosphorus stoichiometry of plants and soils of typical shrubs in dayekou basin of Qilian Mountains[J]. *Soils*, 2017, **49**(3): 572-579.
- [20] 马 剑, 刘贤德, 李 广, 等. 祁连山北麓中段青海云杉林土壤水热时空变化特征[J]. 干旱区地理, 2020, **43**(4): 1 033-1 040.
- MA J, LIU X D, LI G, et al. Spatial and temporal variations of soil moisture and temperature of *picea* *Crassifolia* forest in north piedmont of central Qilian Mountains[J]. *Arid Land Geography*, 2020, **43**(4): 1 033-1 040.
- [21] 芦 倩, 李 穗, 刘贤德, 等. 祁连山排露沟流域青海云杉(*Picea crassifolia*)林土壤水分特征[J]. 中国沙漠, 2020, **40**(5): 142-148.
- LU Q, LI Y, LIU X D, et al. Soil moisture variation characteristics of *Picea crassifolia* forestry in pailugou watershed of Qilian Mountains[J]. *Journal of Desert Research*, 2020, **40**(5): 142-148.
- [22] 宋永昌. 植被生态学[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 2001.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [24] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查技术[M]. 北京: 农业出版社, 1992.
- [25] 曾全超, 李 鑫, 董扬红, 等. 黄土高原延河流域不同植被类型下土壤生态化学计量学特征[J]. 自然资源学报, 2016, **31**(11): 1 881-1 891.
- ZENG Q C, LI X, DONG Y H, et al. Ecological stoichiometry of soils in the Yanhe watershed in the Loess Plateau: the influence of different vegetation zones[J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, **31**(11): 1 881-1 891.
- [26] CHENG M, AN S S. Responses of soil nitrogen, phosphorous and organic matter to vegetation succession on the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Arid Land*, 2015, **7**(2): 216-223.
- [27] 陈 娜, 王秀荣, 严小龙, 等. 酸性土壤上缺磷和铝毒对大豆生长的交互作用[J]. 应用生态学报, 2010, **21**(5): 1 301-

- 1 307.
- CHEN N, WANG X R, YAN X L, et al. Interactive effects of P deficiency and Al toxicity on soybean growth: A pot experiment with acid soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, **21**(5): 1 301-1 307.
- [28] BUI E N, HENDERSON B L. C : N : P stoichiometry in Australian soils with respect to vegetation and environmental factors[J]. *Plant and Soil*, 2013, **373**(1-2): 553-568.
- [29] MCGRODDY M E, DAUFRESNE T, HEDIN L O. Scaling of C : N stoichiometry in forests worldwide: implications of terrestrial redfield-type ratios[J]. *Ecology*, 2004, **85**(9): 2 390-2 401.
- [30] 王维奇, 徐玲琳, 曾从盛, 等. 河口湿地植物活体-枯落物-土壤的碳氮磷生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2011, **31**(23): 134-139.
- WANG W Q, XU L L, ZENG C S, et al. Carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometric ratios among live plant-litter-soil systems in estuarine wetland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(23): 134-139.
- [31] 胡小燕, 段爱国, 张建国, 等. 广西大青山杉木人工林碳氮磷生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2020, **40**(4): 1 207-1 218.
- HU X Y, DUAN A G, ZHANG J G, et al. Stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus of Chinese fir plantations in Daqing Mountain, Guangxi[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(4): 1 207-1 218.
- [32] TIAN H Q, CHEN G S, ZHANG C, et al. Pattern and variation of C : N ratios in China's soils: a synthesis of observational data[J]. *Biogeochemistry*, 2010, **98**(1-3): 139-151.
- [33] 朱秋莲, 邢肖毅, 张宏, 等. 黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2013, **33**(15): 4 674-4 682.
- ZHU Q L, XING X Y, ZHANG H, et al. Soil ecological stoichiometry under different vegetation area on loess hilly gully region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(15): 4 674-4 682.
- [34] 赵栋, 王琪, 连娥, 等. 白龙江干旱河谷不同植被土壤碳氮磷化学计量特征[J]. 中国土壤与肥料, 2020, (4): 178-185.
- ZHAO D, WANG Q, LIAN E, et al. Effect of different vegetation types on soil ecological stoichiometry in Bailong River[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2020, (4): 178-185.
- [35] ZHAO F Z, KANG D, HAN X H, et al. Soil stoichiometry and carbon storage in long-term afforestation soil affected by understory vegetation diversity[J]. *Ecological Engineering*, 2015, **74**: 415-422.
- [36] BUI ELISABETH N, HENDERSON BRENT L. C : N : P stoichiometry in Australian soils with respect to vegetation and environmental factors[J]. *Plant and Soil*, 2013, **373**(1-2): 553-568.
- [37] 张光德, 赵传燕, 戎战磊, 等. 祁连山中部不同植被类型土壤生态化学计量特征研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2019, **55**(4): 533-540.
- ZHANG G D, ZHAO C Y, RONG Z L, et al. Ecological stoichiometry of soils with different vegetation types in the middle part of the Qilian Mountains[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2019, **55**(4): 533-540.
- [38] CHAPIN F S III, MATSON P, MOONEY H-A. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology [M]. Springer-Verlag, New York, 2002.
- [39] STERNER R W, ELSER J J. Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements from Molecules to the Biosphere[M]. Princeton University Press, 2002.
- [40] DAWUD S M, RAULUND-RASMUSSEN K, DOMISCH T, et al. Is tree species diversity or species identity the more important driver of soil carbon stocks, C/N ratio, and pH? [J]. *Ecosystems*, 2016, **19**(4): 645-660.
- [41] 董雪, 郝玉光, 辛智鸣, 等. 科尔沁沙地4种典型灌木灌丛下土壤碳、氮、磷化学计量特征[J]. 西北植物学报, 2019, **39**(1): 164-172.
- DONG X, HAO Y G, XIN Z M, et al. Stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus of four typical shrubs in Horqin sandy land[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalis Sinica*, 2019, **39**(1): 164-172.

(编辑:潘新社)