

DOI: 10.5846/stxb201506301387

谢锦, 常顺利, 张毓涛, 王慧杰, 宋成程, 何平, 孙雪娇. 中天山北坡植物土壤生态化学计量特征的垂直地带性规律. 生态学报, 2016, 36(14):

Xie J, Chang S L, Zhang Y T, Wang H J, Song C C, He P, Sun X J. Plant and soil ecological stoichiometry with vertical zonality on the northern slope of the middle Tianshan Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(14):

中天山北坡植物土壤生态化学计量特征的垂直地带性规律

谢 锦¹, 常顺利^{1,*}, 张毓涛², 王慧杰¹, 宋成程¹, 何 平¹, 孙雪娇¹

1 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, 乌鲁木齐 830046

2 新疆林科院森林生态研究所, 乌鲁木齐 830063

摘要:生态化学计量工作专注于植物与土壤的元素比例关系及其环境解释等问题上, 还需要分析在连续环境梯度上元素比例关系的变化规律以进一步加深已有的认识。受水热梯度的影响, 植被与土壤在天山北坡均存在明显的垂直地带性, 这为探讨植物土壤生态化学计量特征的垂直带谱提供了有利条件。在中天山北坡海拔 1000—3840m 范围内, 按海拔梯度对植物和土壤分别采样, 测定其 C、N、P 含量。结果表明: (1) 随海拔的升高, 植物 C、N、P 含量及其计量比变化规律各不相同, C 含量随海拔变化保持不变, 仅山地针叶林显著低于亚高山灌丛草甸、高山垫状植被和山前灌木 ($P < 0.05$); N 含量、C:P、N:P 随海拔先升高后降低, 山地针叶林和亚高山灌丛草甸显著高于山地荒漠草原、山地草原、高山垫状植被 ($P < 0.05$); P 含量、C:N 则是随海拔先降低后升高, 高山垫状植被显著高于其他植被类型, 山地荒漠草原、山前灌木和高山草甸显著高于山地草原、针叶林和亚高山灌丛草甸 ($P < 0.05$)。 (2) 从生活型角度, 乔木、灌木和草本 C、N 含量、C:N 差异不显著, 灌木 P 含量、C:P、N:P 显著高于草本 ($P < 0.05$); 乔木和灌木更受 P 限制, 草本更受 N 限制。 (3) 随海拔的升高, 土壤 C、N、P 含量、C:P、N:P 均先升高后降低, 其中山地针叶林和亚高山灌丛草甸均显著高于山地荒漠草原和山地草原 ($P < 0.05$), 土壤 C:N 表现为一直降低, 山地荒漠草原显著高于其他植被类型 ($P < 0.05$)。 (4) 植物 C、N、P 及计量比与土壤相关性分析中, 仅植物 C:P 与土壤 C:P 相关性显著, 且植物 C、N、P 含量与土壤相关系数小于植物 C:P、N:P 与土壤相关系数。在垂直地带性上, 土壤主要通过生态化学计量比影响植物的生长。

关键词:生态化学计量特征; 土壤; 植被型; 垂直地带性; 天山

Plant and soil ecological stoichiometry with vertical zonality on the northern slope of the middle Tianshan Mountains

XIE Jin¹, CHANG Shunli^{1,*}, ZHANG Yutao², WANG Huijie¹, SONG Chengcheng¹, HE Ping¹, SUN Xuejiao¹

1 Key Laboratory of Oasis Ecology, College of Resource and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

2 Institute of Forest Ecology, Xinjiang Academy of Forestry, Urumqi 830063, China

Abstract: The proportional relationships of nutritional elements with plants, soil, and the environment have been studied intensely. Relationships that occur along continuous environmental gradients should be analyzed to better understand these issues. There are obvious differences in plant and soil types at different points along the hydrothermal gradient, which provide a unique advantage to examine the vertical spectrum of plants and soil ecological stoichiometry. In this study, we examined organic carbon (C), total nitrogen (N), and total phosphorus (P) in plant and soil samples collected along the altitude gradient of the north slopes of the middle Tianshan Mountains (the altitude of which varies from 1000 to 3840 m).

基金项目:2014 年中央财政林业科技推广示范项目; 新疆维吾尔自治区财政林业科技专项资金项目 (xjlk(2014)001)

收稿日期:2015-06-30; **修订日期:**2015-11-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ecocsl@163.com

The results showed that (1) with increasing altitude, C, N, and P content and the stoichiometric ratios in plants leaves differed. C levels were almost invariant, and only the mountain needle leaf forest had significantly lower C levels than the subalpine shrub meadow, alpine cushion vegetation, and piedmont scrub ($P < 0.05$). Second, N content and C:P and N:P ratios first increased and then decreased with altitude, and levels in the mountain needle leaf forest and subalpine shrub meadow were significantly higher than in the mountain desert steppe, mountain steppe, and alpine cushion vegetation ($P < 0.05$). Finally, P content and C:N ratio first decreased and then increased with altitude, and were significantly higher in the alpine cushion vegetation than in the other vegetation types. Moreover, levels in the mountain desert steppe, piedmont scrub, and alpine meadow were significantly higher than in the mountainous steppe, mountain needle leaf forest, and subalpine shrub meadow ($P < 0.05$). (2) There was no significant difference in C content among trees, shrubs, and herbs, and this also true for N and C:N ratio. However, P levels and C:P and N:P ratios were significantly higher in shrubs than in herbs ($P < 0.05$). Trees and shrubs were largely limited by P, and herbs were limited by N. (3) With increasing altitude, soil C, N, and P content and the C:P and N:P ratios first increased and then decreased, and were significantly higher in mountain needle leaf forest and subalpine shrub meadow than in mountain desert steppe and mountainous steppe ($P < 0.05$). The C:N ratio decreased with altitude, and was significantly higher in the mountain desert steppe than in the other vegetation types ($P < 0.05$). (4) Plant C:P ratios were significantly correlated with the soil C:P ratio, and the correlation coefficients of plant and soil C, N, and P content were less than that of the plant stoichiometric ratio and soil. These results suggest that plants are mainly influenced by soil through stoichiometric ratios in the vertical zone.

Key Words: ecological stoichiometry; soil; vegetation types; vertical zonality; Tianshan

生态化学计量学主要研究生态过程中化学元素的含量、比例关系及其随生物和非生物环境因子的变化规律^[1-4]。植物 C、N、P 化学计量是预测陆地生态系统变化的重要指标,因此植物 C、N、P 化学计量逐渐成为陆地植物生态学问题的研究热点^[5-7]。

近年来,在各个尺度^[8-16](从个体到景观)和不同时间系列^[17-21]以及多个因素的控制实验^[22-28](氮素添加、增温等)方面,国内外对生态化学计量比的实测研究开始大量见诸报道,将生态化学计量学特征与环境因子进行偶联的工作也日益活跃^[29-31]。当前,国外研究主要集中在大尺度的生物区系上,且成果大多属于定性结论,定量分析较少;国内在生态化学计量方面的工作大部分集中在几个问题的研究上,如:生态系统类型^[32-33]或演替阶段对植物化学计量特征的影响^[20-21]、物种之间和物种内的不同器官之间计量特征的关联^[34-35]、群落的化学计量学特征及随环境的变化^[33]等。但是,在大尺度上的工作偏少,且多局限在 C:N:P 格局及其驱动因素等较窄的范围内^[6-7]。虽然已见在全球或大区域上的工作报告^[11-15],但多为研究经纬度变化对植物生态化学计量特征的影响,仍缺乏探讨植物土壤生态化学计量特征在海拔梯度上呈现何种垂直带规律的工作^[36-42]。此外,关于干旱区植被土壤生态化学计量特征的研究还比较缺乏,已有的工作报告多针对于荒漠植物^[17-18, 43-44],少见涵盖干旱区其他隐域性植被的研究。

天山是亚欧大陆腹地一条巨大的独立纬向山系,由于水热配比关系存在明显的垂直地带性,植被与土壤也呈现明确的垂直带谱,非常适于开展生态化学计量特征垂直带谱及其形成机制的研究。因此,本文在中天山北坡设置样带按海拔梯度采集植物叶片和表层土壤,在测定各海拔梯度植物和土壤的有机碳(C)、全氮(N)和全磷(P)含量的基础上,拟回答以下科学问题:(1)中天山北坡植被和土壤生态化学计量特征的垂直地带性规律;(2)在垂直地带性上,植物与土壤在生态化学计量特征上有何联系。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

以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)为依托进行样品采集,位于中天山北坡乌鲁木齐县板房沟林场,定位站驻地海拔 1908m。本工作样品采集范围为海拔 1000m 至 3840m。详见表 1 和表 2。

表 1 中天山北坡气候的垂直分布特点^[45]

Table 1 The vertical distribution characteristics of climate in the northern slope of the middle Tianshan Mountains					
垂直气候带 Vertical climatic zones	海拔/m Altitudes	温度 Temperature/℃		降水 Precipitation	
		最热月 平均气温 MTWM	最冷月 平均气温 MTCM	年降水量/mm MAP	干燥度 Aridity index
前山冲积扇、冲积平原温带	1000—1300	20—26	−20—−12	100—300	30—60
山地寒温带半干旱草原气候	1300—1800	16—20	−12—−11	250—350	1.6—2.99
中山寒温带半湿润针叶林气候	1800—2800	10—16	−11—−9	350—600	1.0—1.59
亚高山寒带半湿润草甸气候	2800—3200	3—7	−18—−14	350—450	<0.99
高山寒带半湿润草甸气候	3200—3800	3—7	−18—−14	350—450	<0.99
高山寒带荒漠气候	3800—4000	0—3	−20—−18	—	—

最热月平均气温:Mean air temperature of the warmest month (MTWM); 最冷月平均气温:Mean air temperature of the coldest month (MTCM); 年降水量:Mean annual precipitation (MAP); 前山冲积扇、冲积平原温带:Front mountain-alluvial plain temperate zone; 山地寒温带半干旱草原气候:Semi-arid grassland climate in mountain cold-temperate zone; 中山寒温带半湿润针叶林气候:Semi-humid needle leaf forest climate in middle-mountain cold-temperate zone; 亚高山寒带半湿润草甸气候:Semi-humid meadow climate in sub-high mountain frigid zone; 高山寒带半湿润草甸气候:Semi-humid meadow climate in high mountain frigid zone; 高山寒带荒漠气候:Desert zone in high mountain frigid zone

表 2 中天山北坡不同海拔梯度主要的研究植物及土壤类型

Table 2 Themain plants and soil types along various altitude gradient in the northern slope of the middle Tianshan Mountains				
编号 Codes	海拔 Altitude	植被型 Vegetation types	主要采集植物种类 Main collected species	土壤类型 Soil types
I	1000—1100m	山地荒漠草原	多枝柽柳(<i>Tamarixramosissima</i> Ldb.)猪毛菜(<i>Salsolacollina</i> Pall.)、花柴(<i>Kareliniacaspica</i> (Pall.)Less)、骆驼蓬(<i>Peganumharmala</i> L.)	山地棕钙土
II	1100—1600m	山地草原	新疆针茅(<i>Stipasareptana</i> Becker)、芨芨草(<i>Agropyronpectinatum</i> (M.B.)Beauv.)、冷蒿(<i>Artemisiafrigida</i> Willd.)、小蓬(<i>Nanophytoneriaceum</i> (Pall.)Bge.)、小新塔花(<i>Ziziphoratenuior</i> L.)、驼绒藜(<i>Ceratoideslateens</i> (J.F.Gmel.)Reveal.et holmgren)、天仙子(<i>Hyoscyamusniger</i> L.)	山地栗钙土
III	1600—1760m	山前灌木	小檗(<i>Berberisthunbergii</i> DC.)、多刺蔷薇(<i>Rosaacicularis</i> Lindl.)、黑果枸杞(<i>Cotoneastermelanocarpus</i> Lodd.)、锦鸡儿(<i>Caraganaleucophloea</i> Pojark.)	灰褐色森林土
IV	1760—2800m	山地针叶林	雪岭云杉(<i>PiceaSchrenkiana</i>)、天山桦(<i>Betulianschanica</i> Rupr.)、天山柳(<i>Salix tianschanica</i> Rgl.)、天山花楸(<i>Sorbustianschanica</i> Rupr.)、忍冬(<i>Lonicerahispida</i> Pall.)、小檗(<i>Berberisthunbergii</i> DC.)、老鹳草(<i>Geraniumrotundifolium</i> L.)、天山羽衣草(<i>Alchemillatianschanica</i> Juz.)、羊角芹(<i>Aegopodiumpodagraria</i> L.)、早熟禾(<i>Poanemoralis</i> L.)	灰褐色森林土
V	2800—3100m	亚高山灌丛草甸	新疆方枝柏(<i>Juniperuspseudosabina</i>)、老鹳草(<i>Geraniumrotundifolium</i> L.)、天山羽衣草(<i>Alchemillatianschanica</i> Juz.)、火绒草(<i>Leontopodium</i> R.Br.)、高山早熟禾(<i>Poaalpine</i> L.)	亚高山草甸土
VI	3100—3500m	高山草甸	线叶蒿草(<i>Kobresiacapillifolia</i> C.B.Clarke)、矮生蒿草(<i>Kobresiahumilis</i> (C.A.M.)Serg.)、珠芽蓼(<i>Polygonumviviparum</i> L.)、苔草(<i>Carex</i> spp.)、高山早熟禾(<i>Poaalpina</i> L.)	高山草甸土
VII	3500—3840m	高山垫状植被	丛生囊种草(<i>Thylacospermumcaespitosum</i> (Camb.)Schischk)、披碱草(<i>Elymus</i> spp.)、高山点地梅(<i>Androsaceolgae</i> Ovcz.)、黄白火绒草(<i>Leontopodiumochroleucum</i> Beauv.)、兔耳草(<i>LagotisGaertn.</i>)、尤尔都斯苔草(<i>Carexmelananthiformis</i> Litv.)	大小不等的碎石和少量细土

1.2 样品采集方法

采样于 2013 年 8 月进行,从低海拔(1000m)到高海拔(3840m),按每 100m 一个海拔梯度,在每个梯度内设置 3 个采样点(各采样点水平距离大于 100m),分别采集乔木层、灌木层、草本层的当年生叶片,并采集表层(0—20cm)土壤,共采集植物样品 294 份,土壤样品 87 份。

对于乔木层,在每个采样点,布设 3 个 20m×20m 样方,进行每木检尺,选取接近平均胸径的 3 株作为采样株,采集东、西、南、北 4 个方位的中部的新生叶,将不同部位的叶片混合,采用四分法取样,装入样品袋标记,带回实验室处理。

对于灌木层,在每个采样点,按照灌木种类的不同,分别布设 5m×5m 样方,测定地径和冠幅,选取接近平均地径的 3 株作为采样株,按照与乔木层同样的方法取样,装入样品袋标记,带回实验室处理。

对于草本层,在每个采样点,布设 1m×1m 的样方,调查样方内草本种类、高度、盖度等群落信息,然后采集样方内全部的地上部分,装入样品袋标记,带回实验室处理。

1.3 样品测试方法

用于测定叶片有机 C、全 N、全 P 的叶片在 105℃ 烘箱中杀青 30min,然后 65℃ 下烘干 24h。将烘干后的样品粉碎,过 0.149mm 筛(100 目)备用。植物有机 C 的测定采用重铬酸钾-硫酸氧化法;全 N 的测定采用硫酸-高氯酸消煮、靛酚蓝分光光度法测定,全 P 的测定采用硫酸-高氯酸消煮、钼锑抗比色法测定。

用于测定土壤有机 C、全 N、全 P 的样品自然风干后,经研磨过 0.149mm 筛备用。土壤有机 C 的测定采用重铬酸钾氧化-外加热法;土壤全 N 的测定采用扩散法;土壤全 P 的测定采用酸溶-钼锑抗比色法。

1.4 数据处理

采用 Ecel—2007 和 SPSS17.0 软件对数据进行统计分析,由 origin9.0 作图。植物叶片与土壤 C:N、C:P 和 N:P 化学计量比采用百分含量比表示。各植被型植物叶片和土壤 C、N、P 含量及其计量比为该海拔范围内植物及土壤 C、N、P 含量算术平均值,各生活型植物叶片 C、N、P 含量及其计量比同样为算术平均值。采用单因素方差(one Way ANOVA)分析比较不同植被型、不同生活型植物叶片 C、N、P 含量及其计量比的差异,判断海拔对植物 C、N、P 含量及其计量比的影响($p<0.05$);采用单因素方差分析(one Way ANOVA)分析不同植被型下土壤 C、N、P 含量及其计量比的差异;采用 Pearson 相关分析方法判断植物与土壤 C、N、P 含量及其计量比之间的相关性。

2 结果与分析

2.1 中天山北坡植被 C、N、P 含量及其计量比随海拔的变化特征

2.1.1 不同植被型植物叶片的 C、N、P 及其计量比特征

由图 1 可见,不同植被型植物叶片的 C、N、P 生态化学计量特征存在差异。植物叶片 C 含量,山地针叶林显著低于亚高山灌丛草甸、高山垫状植被和山前灌木,其他植被型之间差异均不显著($P<0.05$)。植物叶片 N 含量,山地针叶林显著高于山地荒漠草原、山前灌木、高山草甸和高山垫状植被,高山灌丛草甸显著高于山地荒漠草原和高山垫状植被($P<0.05$)。植物叶片 P 含量,山地荒漠草原、山地草原和高山草甸三者之间差异不显著,但均显著高于山前灌木、山地针叶林、亚高山灌丛草甸和高山垫状植被($P<0.05$)。

植物叶片 C:N,高山垫状植被显著高于其他植被类型,山地荒漠草原、山前灌木和高山草甸均显著高于山地草原、针叶林和亚高山灌丛草甸($P<0.05$)。植物叶片 C:P,山地针叶林和亚高山灌丛草甸均显著高于山地荒漠草原、山地草原和高山草甸($P<0.05$)。植物叶片 N:P,针叶林和亚高山灌丛草甸显著高于山地荒漠草原、山地草原、山前灌木、高山草甸、高山垫状植被。针叶林和亚高山灌丛草甸二者之间相差较小,且均大于 16:1,而山地荒漠草原、山地草原、山前灌木、高山草甸和高山垫状植被之间较为接近,且均小于 14:1。

2.1.2 不同生活型植物叶片的 C、N、P 及其计量比特征

由表 3 可见,不同生活型植物叶片 C、N、P 生态化学计量特征存在一定差异。植物叶片 C 含量,灌木>乔

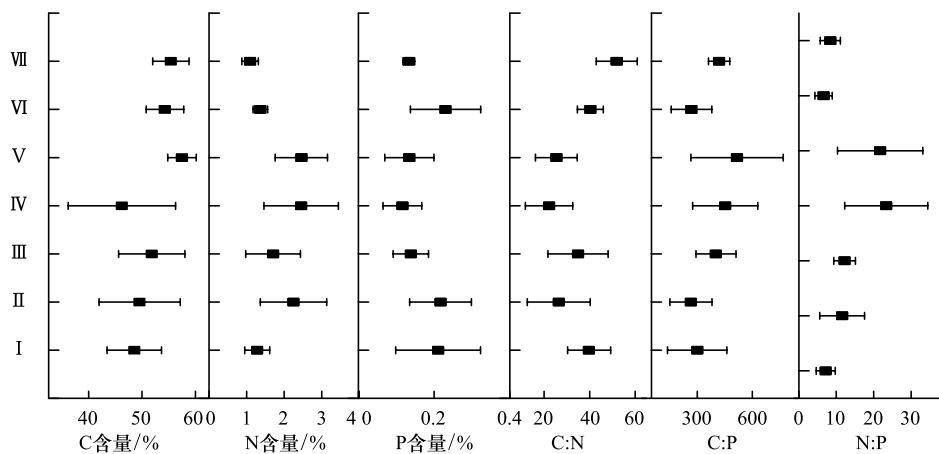


图 1 不同植被型植物叶片 C、N、P 含量及化学计量比差异

Fig.1 The difference of leaf C, N, P contents and stoichiometry in different vegetation types

I : 山地荒漠草原; II : 山地草原; III : 山前灌木; IV : 山地针叶林; V : 亚高山灌丛草甸; VI : 高山草甸; VII : 高山垫状植被

木>草本,三者之间差异不显著。植物叶片 N 含量,乔木>灌木>草本,三者之间差异也不显著。植物叶片 P 含量,草本>乔木>灌木,草本叶片 P 含量显著高于乔木和灌木($P<0.05$)。植物叶片 C:N,变化范围为 24.6—29.2,草本>灌木>乔木,但三者之间差异不显著。植物叶片 C:P,灌木>乔木>草本,灌木与草本差异显著,乔木与灌木和草本均不存在显著差异($P<0.05$)。植物叶片 N:P,灌木和乔木叶片 N:P 均大于 16,草本则大于 14 小于 16,灌木显著大于草本,乔木与灌木和草本均不存在显著差异($P<0.05$)。

表 3 不同生活型植物叶片 C、N、P 含量及其化学计量比

Table 3 The leaf C, N, P contents and stoichiometry of different life forms

生活型 Life form	C/%	N/%	P/%	C : N	C : P	N : P
乔木 Trees	49.24±8.31 ^a	2.37±1.08 ^a	0.14±0.06 ^b	24.6±9.8 ^a	400.9±138.4 ^{ab}	17.6±6.0 ^{ab}
灌木 Shrubs	50.71±7.84 ^a	2.12±0.87 ^a	0.13±0.06 ^b	28.2±12.1 ^a	483.8±199.8 ^a	20.1±12.1 ^a
草本 Herb	47.44±9.34 ^a	2.07±0.96 ^a	0.18±0.09 ^a	29.2±15.9 ^a	314.3±119.4 ^b	14.4±10.4 ^b

每一列数据后的相同小写字母表示同一指标在 0.05 水平下差异不显著,不同小写字母代表差异显著

2.2 中天山北坡土壤 C、N、P 含量及其计量比随海拔的变化特征

由图 2 可见,土壤 C、N、P 含量随海拔升高的变化规律明显,总体表现为先升高后降低的趋势。土壤 C 含量,山地针叶林、亚高山灌丛草甸和高山草甸三者之间差异不显著,但均显著高于高山垫状植被、山前灌木、山地荒漠草原和山地草原,而高山垫状植被又显著高于山地荒漠草原和山地草原($P<0.05$)。土壤 N 含量,山地针叶林和亚高山灌丛草甸显著高于山地荒漠草原、山地草原和山前灌木,而山前灌木显著高于山地荒漠草原和山地草原($P<0.05$)。土壤 P 含量,亚高山灌丛草甸、高山草甸均显著高于山地荒漠草原、山地草原、山前灌木($P<0.05$)。

土壤 C:P、N:P 计量比随海拔的变化规律与 C、N、P 的变化规律相似(图 2),而 C:N 变化不同,随海拔的升高而降低。中天山北坡土壤 C:N,山地荒漠草原显著高于其他植被类型,其他各植被型之间差异不显著($P<0.05$);土壤 C:P 和 N:P 均表现为:山地针叶林显著高于山地荒漠草原、山地草原、山前灌木、高山草甸、高山垫状植被,山前灌木和亚高山灌丛草甸显著高于山地荒漠草原和山地草原($P<0.05$)。

2.3 中天山北坡植物与土壤的元素计量比关系

由表 4 可见,植物叶片 C、N 含量、C:N、C:P、N:P 与土壤中对应的 C、N 含量、C:N、C:P、N:P 为正相关关系,植物叶片 C、N、P 含量与土壤相关系数较小,而植物叶片 C:P、N:P 与土壤 C:P、N:P 相关系数较大,而且植物叶片 C:P 与土壤 C:P 相关性显著($P<0.05$)。植物叶片中 P 含量与土壤中 P 含量呈负相关关系,相关性

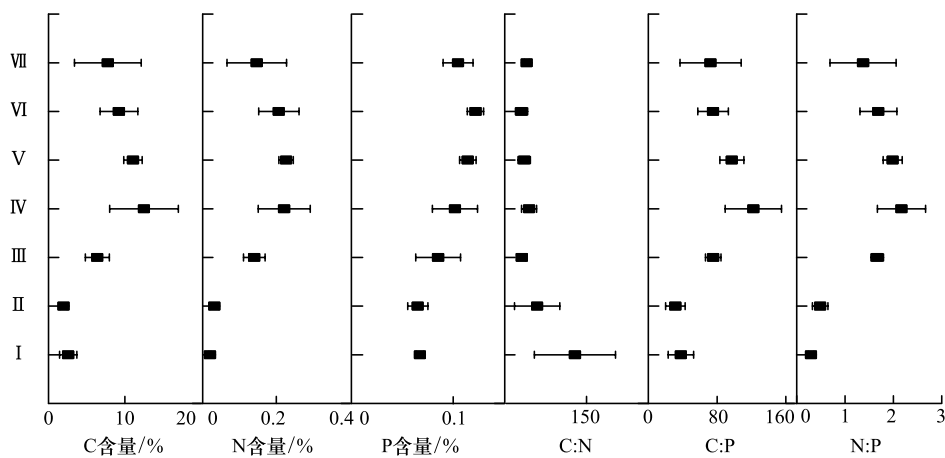


图2 不同植被类型土壤 C、N、P 含量及化学计量比差异

Fig.2 The difference of soil C, N, P contents and stoichiometry in different vegetation types

不显著。

表 4 中天山北坡植物叶片与土壤 C、N、P 含量及其计量比之间的相关系数

Table 4 The correlation coefficient between plant leaf and soil C, N, P contents and stoichiometry in northern slope of the middle Tianshan Mountains

土壤 Soil	叶片 Leaf					
	C	N	P	C:N	C:P	N:P
C	0.269	0.346	-0.631	-0.241	0.704	0.655
N	0.412	0.298	-0.552	-0.189	0.640	0.560
P	0.608	0.004	-0.338	0.115	0.447	0.253
C:N	-0.490	-0.272	0.420	0.115	-0.402	-0.330
C:P	0.097	0.423	-0.737	-0.336	0.764 *	0.746
N:P	0.299	0.364	-0.673	-0.26	0.707	0.635

*. 在 0.05 水平(双侧)上显著相关

3 讨论

3.1 植被生态化学计量特征比较

3.1.1 中天山北坡植物叶片 C、N、P 含量的总体特征

与全球和中国等不同尺度数据相比,本研究区域叶片 C 含量较高,N、P 含量较低(见表 5)。造成这种差异是因为陆地生态系统的矿质营养的获取主要通过当地风化和微生物分解,因此,陆地生态系统的养分状况有很强的区域特点^[12]。

表 5 中天山北坡植物叶片 C、N 和 P 含量与其他结果的比较

Table 5 Comparisons between leaf C, N and P in the northern slope of middle Tianshan Mountains and other studies

研究区域 Study region	C/%	N/%	P/%
全球陆地植物 Global terrestrial plants	46.4 ^[2]	2.01 ^[8]	0.18 ^[8]
全国陆生植物 Chinese terrestrial plants	\	1.86 ^[11]	1.22 ^[11]
中国东部南北样带森林生态系统植物 Plants in forest ecosystem along the North-South Transect of East China	48.0 ^[15]	1.83 ^[15]	0.20 ^[15]
中国草地生态系统植物 Chinese grassland	43.8 ^[12]	2.02 ^[12]	0.15 ^[11]
新疆草原植物 Xinjiang grassland	43.4 ^[12]	2.59 ^[12]	0.19 ^[13]
本研究 This study	51.9	1.80	0.17

每一列数据后的数字代表所引文献

3.1.2 不同植被型 C、N、P 及其计量比差异

本研究中,植物叶片 C 含量随海拔梯度的变化表现的较为稳定,与樊晓勇等对祁连山的研究结果较一致^[40]。不同植被型之间比较,高海拔地区(亚高山灌丛草甸、高山草甸和高山垫状植被)植物叶片 C 含量高于中低海拔地区(山地荒漠草原、山地草原、山前灌木和针叶林),这可能是因为高海拔的气候条件下植物有较高的 C 含量^[29],且高海拔范围内土壤养分含量丰富,植物可从土壤中获得足够的 C。

随海拔的升高,植物叶片 N 含量先升高后降低,最高为亚高山灌丛草甸,针叶林与之相差极小,最低的为高山垫状植被。高海拔地区陆地植物叶片中较高的氮含量被认为是低温的结果,是植物的一种适应机制^[8]。但本研究中,随海拔的升高,叶片氮含量并没有表现为单调上升,可能是研究区气候背景不同导致物种组成的差异。此外,前人研究得出:叶寿命长的常绿植物通常叶片含 N 量低,而叶寿命短的落叶植物通常叶片含 N 量高^[12]。但本研究中针叶林叶片含 N 较高,这可能是由于针叶林分布范围内土壤 N 含量较高,针叶林进行奢侈吸收,使得体内 N 含量丰富;此外,植物幼嫩组织中通常含有较高的 N 含量,而本研究中采集叶片恰好为当年新生叶片,因此叶片 N 含量较高。

植物叶片 P 含量,随海拔的升高先下降后上升,最高为高山草甸,其次为山地荒漠草原和山地草原,针叶林最小。这可能是因为:一,根据温度-植物生理假说,高海拔地区植物叶片营养含量增加是由于低温诱导所引起,是植物抗冷机制的一种适应^[40];二,不同的植物种类对养分的需求以及分配不同,针叶林和灌木等木本植物吸收营养的很大部分用于构建保卫构造和结构物质^[46],而草本更多的将养分用于快速生长^[47]。

植物叶片的 C:N 和 C:P 表示植物吸收营养所能同化 C 的能力,可反映植物的养分利用效率^[48]。本研究中发现,天山北坡不同植被型植物叶片 C:N 和 C:P 高于全球植物平均水平(22.5 和 232),同时高于中国草原植物叶片 C:N 平均水平(17.9)^[12],但均分布于中国东部南北样带森林生态系统 102 个物种 C:N(14.1—64.1)和 C:P(70.9—838.6)范围内^[15]。说明该地区植物的养分利用效率较高。此外,由植物叶片内 C、N、P 含量及其计量比之间关系发现,N 元素含量对 C:N 有极显著的影响,P 元素含量则对 C:P 有显著影响(表 6),说明该地区植物养分利用效率最终由 N 和 P 含量决定。

植物叶片的 N:P 化学计量特征受环境和植物的共同影响,决定了植物特定的生长策略,表征植物氮磷限制状况(N:P < 14 为 N 限制,N:P > 16 为 P 限制)^[18]。本研究中针叶林和亚高山灌丛草甸的 N:P 大于 16,P 素被认为是这两种植被型的限制元素,其他植被型均小于 14,则被认为是 N 限制型。在本区域植物叶片 N:P 与叶片 N 含量相关性极显著,同时分别与 C:N、C:P 相关性显著,证明植物吸收营养元素存在一定的比例关系,而且在该地区 N 元素含量在植物吸收元素过程中起主要作用(见表 6),前人的研究也表明温带和北方林明显受到氮的限制^[27]。

表 6 植物叶片中 C、N、P 含量及其计量比之间相关系数

Table 6 The correlation coefficient of plant leaf C, N, P content and stoichiometry

元素 Elements	C	N	P	C:N	C:P	N:P
C	1					
N	-0.2	1				
P	-0.156	-0.305	1			
C:N	0.372	-0.961 **	0.139	1		
C:P	0.318	0.425	-0.940 **	-0.258	1	
N:P	-0.11	0.877 **	-0.671	-0.794 *	0.765 *	1

* *. 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。*, 在 0.05 水平(双侧)上显著相关

3.1.3 不同生活型 C、N、P 及其计量比差异

中天山北坡乔木、灌木和草本三种生活型植物间的叶片 C、N 含量和 C:N 差异不显著,而 P 含量、C:P 和 N:P 存在差异($P < 0.05$),说明不同生活型植物对同一气候环境的适应能力不同,所表现出的养分适应策略不同。木本植物的 C、N 含量、C:P 和 N:P 高于草本植物,P 含量、C:N 低于草本植物。这与已有的研究结果基

本一致,不同的是叶片 N 含量,Han 等^[11]和 Warren 等^[49],认为草本植物 N 含量明显高于木本,但本研究中木本植物 N 含量高于草本植物。这可能是由于木本植物与草本植物相比,根系更为发达,当 N 资源缺乏时,在抢夺有限资源过程中更有优势。

3.2 土壤生态化学计量特征比较

研究结果表明,天山北坡中段土壤有机 C、全 N、全 P 平均含量为 7.35%、0.14%、0.09%,高于全国土壤有机 C、全 N、全 P 平均含量为 1.12%、0.11%、0.07%^[50]。说明天山地区的水热条件有利于营养物质的积累,土壤较为肥沃。依据全国第二次土壤普查养分分级标准^[51],将中天山北坡不同植被型土壤养分含量分级(表 7)。

表 7 中天山北坡不同植被型土壤 C、N、P 含量等级

Table 7 The degree of soil C, N and P contents in different vegetation types in northern slope of the Middle Tianshan Mountains

植被型 Vegetation types	C	N	P
山地荒漠草原 Mountains Desert Steppe	i	vi	iii
山地草原 Mountains Steppe	iv	vi	iii
山前灌木 Piedmont Scrub	i	iii	ii
山地针叶林 Mountains Needle leaf Forest	i	i	i
亚高山灌丛草甸 Subalpine Scrub and Meadow	i	i	i
高山草甸 Alpine Meadow	i	i	i
高山垫状植被 Alpine Cushion Vegetation	i	iii	i

可见,本研究区内土壤有机 C 和 P 含量较高,而且不同植被类型间差异较小;土壤 N 含量相对较低,而且变化较大。土壤 C、N、P 含量都存在中高海拔地区(山地针叶林带、亚高山灌丛草甸带、高山草甸带和高山垫状植被带)大于低海拔地区(山地荒漠草原带、山地草原带、山前灌木带)的规律,说明水热组合条件较好的森林和草甸区土壤养分含量高于较为干旱的草原区。

一般,土壤有机质 C:N 与其分解速度呈反比关系^[6],天山北坡不同植被类型土壤 C:N 不存在显著差异,说明天山不同植被类型土壤有机质分解速度相近。本研究中,土壤 C:N 显著高于全球和全国土壤 C:N 平均水平(14.3 和 10—12)^[52-53],原因是不同植被类型下土壤有机 C 含量远高于全国和其他地区 C 含量,进而导致 C:N 变高。

土壤 C:P 指示磷有效性的高低^[54],对植物的生长发育具有重要影响。中天山北坡土壤 C:P 平均值(73.06),在我国各类生态系统中处于较高水平^[55],说明该地区土壤磷的有效性较高。而且不同植被型土壤 C:P 存在显著差异,其中针叶林最高,山地草原最低,两者差异显著,同已往的研究发现一致(森林土壤 C:P 普遍高于草原土壤 C:P)^[55],原因可能是针叶林下覆盖厚的腐殖质层,更为适宜微生物的生存,使得有机质被微生物更快的分解从而释放养分。

土壤 N:P 可以作为养分限制类型的有效预测指标,天山北坡不同植被型土壤 N:P 存在显著差异,说明不同植被型之间存在不同的养分限制类型。该地区土壤 N:P 较小,是因为土壤中 N 含量相对较低,而 P 含量较丰富。

3.3 植物与土壤之间关系

植物体内化学元素主要来源于土壤,其含量高低与土壤含量密切相关。有研究表明,植物 N、P 与土壤 N、P 之间存在显著的线性正相关关系^[18]。本研究中,植物叶片中 C、N 含量与土壤 C、N 含量呈正相关关系,植物叶片 P 含量与土壤 P 含量为负相关关系,但相关性均不显著(见表 3)。植物体内化学元素的含量受到植物种类、生长发育阶段、群落特征、土壤特性和生存环境的影响,因此其营养元素含量差异很大^[54]。这在一定程度解释了植物叶片营养元素含量与土壤之间相关性不显著。而植物 P 含量与土壤之间负相关,则是由于土壤 P 含量过剩。植物叶片 C、N、P 计量比与土壤 C、N、P 计量比相关系数较 C、N、P 含量之间相关系数大,

说明土壤养分含量对植物的影响主要通过生态化学计量比来调节。

4 结论

中天山北坡植被土壤生态化学计量特征垂直地带性规律明显:随海拔升高,植物 C 含量基本不变,N 含量、C:P、N:P 先升高后降低,P 含量、C:N 则是先降低后升高;土壤 C、N、P 含量、C:P、N:P 先升高后降低,C:N 则是一直降低。在垂直地带性上,土壤主要通过生态化学计量比影响植物的生长。从生活型来看,乔木、灌木和草本生态化学计量差异较小,乔木和灌木主要受 P 限制,草本则更受 N 限制。对于该地区植被与土壤生态化学计量特征可划分为生态化学计量垂直带谱,并结合降水、温度数据和物种信息进行定量分析探讨其成因。此外,还需要在不同尺度进一步研究,如天山不同地区植被土壤垂直带谱的比较。

参考文献(References):

- [1] Koerselman W, Meuleman A F M. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation. *The Journal of Applied Ecology*, 1996, 33(6): 1441-1450.
- [2] Elser J J, Fagan W F, Denno R F, Dobberfuhl D R, Folarin A, Huberty A, Interlandi S, Kilham SS, McCauley E, Schulz KL, Siemann EH, Sterner RW. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs. *Nature*, 2000, 408(6812): 578-580.
- [3] Zhang L X, Bai Y F, Han X G. Application of N:P stoichiometry to ecology studies. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45(9): 1009-1018.
- [4] 曾德慧, 陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索. *植物生态学报*, 2005, 29(6): 1007-1019.
- [5] Matzek V, Vitousek P M. N:P stoichiometry and protein: RNA ratios in vascular plants: an evaluation of the growth-rate hypothesis. *Ecology Letters*, 2009, 12(8): 765-771.
- [6] 王邵强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征. *生态学报*, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [7] 刘超, 王洋, 王楠, 王根轩. 陆地生态系统植被氮磷化学计量研究进展. *植物生态学报*, 2012, 36(11): 1205-1216.
- [8] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude. *Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(30): 11001-11006.
- [9] McGroddy M E, Daufresne T, Tedin L O. Scaling of C:N:P stoichiometry in forests worldwide: implications of terrestrial Redfield-type ratios. *Ecology*, 2004, 85(9): 2390-2401.
- [10] Kerkhoff A J, Enquist B J, Elser J J, Fagan W F. Plant allometry, stoichiometry and the temperature-dependence of primary productivity. *Global Ecology and Biogeography*, 2005, 14(6): 585-598.
- [11] Han W X, Fang J Y, Guo D L, Zhang Y. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China. *New Phytologist*, 2005, 168(2): 377-385.
- [12] He J S, Fang J Y, Wang Z H, Guo D L, Flynn D F B, Geng Z. Stoichiometry and large-scale patterns of leaf carbon and nitrogen in the grassland biomes of China. *Oecologia*, 2006, 149(1): 115-122.
- [13] He J S, Wang L, Flynn D F B, Wang X P, Ma W H, Fang J Y. Leaf nitrogen: phosphorus stoichiometry across Chinese grassland biomes. *Oecologia*, 2008, 155(2): 301-310.
- [14] Han W X, Fang J Y, Reich P B, Woodward F I, Wang Z H. Biogeography and variability of eleven mineral elements in plant leaves across gradients of climate, soil and plant functional type in China. *Ecology Letters*, 2011, 14(8): 788-796.
- [15] 任书杰, 于贵瑞, 姜春明, 方华军, 孙晓敏. 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. *应用生态学报*, 2012, 23(3): 581-586.
- [16] 朱秋莲, 邢肖毅, 张宏, 安韶山. 黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征. *生态学报*, 2013, 33(15): 4674-4682.
- [17] 牛得草, 李茜, 江世高, 常佩静, 傅华. 阿拉善荒漠区 6 种主要灌木植物叶片 C:N:P 化学计量比的季节变化. *植物生态学报*, 2013, 37(4): 317-325.
- [18] 肖遥, 陶冶, 张元明. 古尔班通古特沙漠 4 种荒漠草本植物不同生长期的生物量分配与叶片化学计量特征. *植物生态学报*, 2014, 38(9): 929-940.
- [19] 胡启武, 聂兰琴, 郑艳明, 吴琴, 尧波, 郑林. 沙化程度和林龄对湿地松叶片及林下土壤 C、N、P 化学计量特征影响. *生态学报*, 2014, 34(9): 2246-2255.
- [20] 林丽, 李以康, 张法伟, 杜岩功, 郭小伟, 李靖, 刘淑丽, 曹广民. 高寒矮嵩草群落退化演替系列氮、磷生态化学计量学特征. *生态学报*, 2013, 33(17): 5245-5251.
- [21] 马文济, 赵延涛, 张晴晴, Arshad A, 史青茹, 阎恩荣. 浙江天童常绿阔叶林不同演替阶段地表凋落物的 C:N:P 化学计量特征. *植物生态学报*, 2014, 38(8): 833-842.
- [22] Venterink H O, Gusewell S. Competitive interactions between two meadow grasses under nitrogen and phosphorus limitation. *Functional Ecology*, 2010, 24(4): 877-886.
- [23] Yang Y H, Luo Y Q, Lu M, Schädel C, Han W H. Terrestrial C:N stoichiometry in response to elevated CO₂ and N addition: a synthesis of two

- meta-analyses. *Plant and Soil*, 2011, 343(1/2): 393-400.
- [24] 安 卓, 牛得草, 文海燕, 杨益, 张洪荣, 傅华. 氮素添加对黄土高原典型草原长芒草氮磷重吸收率及 C:N:P 化学计量特征的影响. *植物生态学报*, 2011, 35(8): 801-807.
- [25] 严正兵, 金南瑛, 韩廷申, 方精云, 韩文轩. 氮磷施肥对拟南芥叶片碳氮磷化学计量特征的影响. *植物生态学报*, 2013, 37(6): 551-557.
- [26] 宾振钧, 王静静, 张文鹏, 徐当会, 程雪寒, 李柯杰, 曹德昊. 氮肥添加对青藏高原高寒草甸 6 个群落优势种生态化学计量学特征的影响. *植物生态学报*, 2014, 38(3): 231-237.
- [27] 王晶苑, 张心昱, 温学发, 王绍强, 王辉民. 氮沉降对森林土壤有机质和凋落物分解的影响及其微生物学机制. *生态学报*, 2013, 33(5): 1337-1346.
- [28] 江肖洁, 胡艳玲, 韩建秋, 周玉梅. 增温对苔原土壤和典型植物叶片碳、氮、磷化学计量学特征的影响. *植物生态学报*, 2014, 38(9): 941-948.
- [29] Kerkhoff A J, Fagan W F, Elser J J, Enquist B J. Phylogenetic and growth form variation in the scaling of nitrogen and phosphorus in the seed plants. *The American Naturalist*, 2006, 168(4): E103-E122.
- [30] 王维奇, 徐玲琳, 曾从盛, 全川, 张林海. 闽江河口湿地互花米草入侵机制. *自然资源学报*, 2011, 26(11): 1900-1907.
- [31] 陈军强, 张蕊, 侯尧宸, 马丽娜, 丁路明, 龙瑞军, 尚占环. 亚高山草甸植物群落物种多样性与群落 C、N、P 生态化学计量的关系. *植物生态学报*, 2013, 37(11): 979-987.
- [32] 吴统贵, 陈步峰, 肖以华, 潘勇军, 陈勇, 萧江华. 珠江三角洲 3 种典型森林类型乔木叶片生态化学计量学. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 58-63.
- [33] 杨阔, 黄建辉, 董丹, 马文红, 贺金生. 青藏高原草地植物群落冠层叶片氮磷化学计量学分析. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 17-22.
- [34] 周鹏, 耿燕, 马文红, 贺金生. 温带草地主要优势植物不同器官间功能性状的关联. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 7-16.
- [35] 徐冰, 程雨曦, 甘慧洁, 周文嘉, 贺金生. 内蒙古锡林河流域典型草原植物叶片与细根性状在种间及种内水平上的关联. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 29-38.
- [36] 刘旻霞. 高寒草甸坡向梯度上植物群落组成及其氮磷化学计量学特征的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- [37] 郭宝华. 不同生产力水平毛竹林碳氮磷生态化学计量特征研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
- [38] 栗忠飞, 刘文胜, 张彬, 郑征. 西双版纳热带雨林幼树 C、N、P 的生态化学计量比对海拔变化的响应. *中南林业科技大学学报*, 2012, 32(5): 80-85.
- [39] 张晓飞. 秦岭两种栎属植物叶性状及其关系沿海拔梯度的变化[D]. 西安: 西北大学, 2012.
- [40] 樊晓勇. 祁连山老虎沟优势植物的养分空间变化与生态化学计量学研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
- [41] 洪江涛, 吴建波, 王小丹. 藏北高寒草原紫花针茅根系碳氮磷生态化学计量学特征. *山地学报*, 2014, 32(4): 467-474.
- [42] 李婷, 邓强, 袁志友, 焦峰. 黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征. *环境科学*, 2015, 36(8): 2988-2996.
- [43] 李从娟, 雷加强, 徐新文, 唐清亮, 高培, 王永东. 塔克拉玛干沙漠腹地人工植被及土壤 CNP 的化学计量特征. *生态学报*, 2013, 33(18): 5760-5767.
- [44] 陶冶, 张元明. 古尔班通古特沙漠 4 种草本植物叶片与土壤的化学计量特征. *应用生态学报*, 2015, 26(3): 659-665.
- [45] 周霞. 天山北坡中段气候垂直分异研究. *干旱区地理*, 1995, 18(2): 52-60.
- [46] Onoda Y, Hikosaka K, Hirose T. Allocation of nitrogen to cell walls decreases photosynthetic nitrogen-use efficiency. *Functional Ecology*, 2004, 18(3): 419-425.
- [47] Wright IJ, Reich PB, Westoby M, Ackerly DD, Baruch Z, Bongers F, Cavender-Bares J, Chapin T, Cornelissen JHC, Diemer M, Flexas J, Garnier E, Groom PK, Gullas J, Hikosaka K, Lamont BB, Lee T, Lee W, Lusk C, Midgley JJ, Navas ML, Niinemets Ü, Oleksyn J, Osada N, Poorter H, Poot P, Prior L, Pyankov VI, Roumet C, Thomas SC, Tjoelker MG, Veneklaas EJ, Villar R. The worldwide leaf economics spectrum. *Nature*, 2004, 428(6985): 821-827.
- [48] 郭子武, 陈双林, 杨清平, 李迎春. 密度对四季竹叶片 C、N、P 化学计量和养分重吸收特征的影响. *应用生态学报*, 2013, 24(4): 893-899.
- [49] Warren C R, Adams M A. Evergreen trees do not maximize instantaneous photosynthesis. *Trends in Plant Science*, 2004, 9(6): 270-274.
- [50] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, Melillo J M, Hall C A. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1/3): 139-151.
- [51] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查技术. 北京: 中国农业出版社, 1992.
- [52] Cleveland C C, Liptzin D. C:N:P stoichiometry in Soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass?. *Biogeochemistry*, 2007, 85(3): 235-252.
- [53] 黄昌勇. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [54] 俞月凤, 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 王克林, 文丽, 范夫静. 喀斯特峰丛洼地不同森林类型植物和土壤 C、N、P 化学计量特征. *应用生态学报*, 2014, 25(4): 947-954.
- [55] 王建林, 钟志明, 王忠红, 余成群, 沈振西, 张宪洲, 胡兴祥, 大次卓嘎. 青藏高原高寒草原生态系统土壤碳磷比的分布特征. *草业学报*, 2014, 23(2): 9-19.