

青藏高原东部窄叶鲜卑花灌丛土壤C、N、P生态化学计量学特征*

贺合亮^{1,2} 阳小成^{1**} 王东² 孙誉育² 尹春英² 李婷² 黎云祥³ 周国英⁴ 张林⁵ 刘庆^{2**}

¹成都理工大学材料与化学化工学院 成都 610059

²中国科学院成都生物研究所, 中国科学院山地生态恢复与生物资源利用重点实验室, 生态恢复与生物多样性保育四川省重点实验室 成都 610041

³西华师范大学生命科学学院 南充 637009

⁴中国科学院西北高原生物研究所 西宁 810008

⁵中国科学院青藏高原研究所 北京 100101

摘要 土壤是陆地生态系统的重要组成部分, 研究土壤生态化学计量学特征对于揭示土壤元素的循环和平衡机制具有重要意义. 采用分层随机抽样方法来布设样地, 选取16个位于青藏高原东部的窄叶鲜卑花灌丛样地进行取样调查, 对土壤样品碳(C)、氮(N)、磷(P)含量进行测定与分析, 并同步分析不同土层C、N、P比值特征. 结果表明: 窄叶鲜卑花灌丛土壤表层(0-10 cm) C、N、P含量的均值分别为(73.27 ± 20.25) g/kg、(6.27 ± 1.8) g/kg和(1.13 ± 0.25) g/kg, 该灌丛土壤C、N、P含量均随土层深度的增加而减少, 且减少的程度不一; C、N含量的变异系数总体上随土层加深而增大, P含量的变异系数相对稳定; C、N之间的相关性和线性拟合程度均高于C、P和N、P. 窄叶鲜卑花灌丛土壤表层(0-10 cm) C/N、C/P和N/P的均值分别为10.88 ± 0.87、59.49 ± 18.64和5.49 ± 1.84, 空间变异性表现为C/N < N/P < C/P, C/N、C/P和N/P的变异系数随着土层加深而增加, 土壤C、N、P的空间分布特征在一定程度上决定了C/N、C/P和N/P的空间分布特征. 本研究结果可为青藏高原灌丛植被保护、恢复和土壤养分管理提供理论依据. 图1 表4 参42

关键词 窄叶鲜卑花; 生态化学计量学; 土壤碳; 土壤氮; 土壤磷; 青藏高原

CLC S714.2 (27)

Ecological stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus of *Sibiraea angustata* shrub in eastern Qinghai-Tibetan Plateau*

HE Heliang^{1,2}, YANG Xiaocheng^{1**}, WANG Dong², SUN Yuyu², YIN Chunying², LI Ting², LI Yunxiang³, ZHOU Guoying⁴, ZHANG Lin⁵ & LIU Qing^{2**}

¹ College of Material and Chemistry & Chemical Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

² Key Laboratory of Mountain Ecological Restoration and Bioresource Utilization & Ecological Restoration Biodiversity Conservation Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

³ The School of Life Science, China West Normal University, Nanchong 637009, China

⁴ Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China

⁵ Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract For a comprehensive understanding of the carbon and nitrogen fixation mechanism of the Qinghai-Tibetan Plateau shrub ecosystem, the content of carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P) in different soil layers is needed to be known. This paper aimed to study the soil C, N and P ecological stoichiometric characteristics of *Sibiraea angustata* shrub in eastern Qinghai-Tibetan Plateau. All together 16 *Sibiraea angustata* shrub sample plots were selected by the stratified sampling method in eastern Qinghai-Tibetan Plateau. We analyzed the distribution characteristics of soil C, N and P content and their stoichiometric ratios. These contents were shown to decrease with the soil depth. The average contents of C, N and P in topsoil (0-10 cm) of the sixteen shrub sample plots were 73.27±20.25 g/kg, 6.27±1.8 g/kg and 1.13±0.25 g/kg, respectively. The coefficient of variation of C, N increased with the soil depth, but that of P was relatively stable. Correlation analysis showed a better correlation between C - N than between C - P and N - P. The average ratios of C/N, C/P and N/P were 10.47±2.56,

收稿日期 Received: 2015-04-08 接受日期 Accepted: 2015-05-12

*中国科学院战略性先导科技专项子课题(XDA05050303)资助 Supported by the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA05050303)

**通讯作者 Corresponding authors (E-mail: liuqing@cib.ac.cn; yxc39@163.com)

38.66±21.66 and 3.67±1.88, respectively, and the ratio of C/N was relatively stable in all soil layers. The coefficients of variation of C/N, C/P and N/P also increased with the soil depth. The results indicated that the distribution characteristics of C/N, C/P and N/P are partly determined by the distribution characteristics of C, N and P. The researches of soil ecological stoichiometry in eastern Qinghai-Tibetan Plateau are helpful for optimal management and protection of ecosystems in maintaining regional ecological security and sustainable development.

Keywords *Sibiraea angustata*; ecological stoichiometry; soil carbon; soil nitrogen; soil phosphorus; Qinghai-Tibetan Plateau

生态化学计量学 (Ecological stoichiometry) 结合了生态学、化学计量学等基本原理, 是研究生物系统能量平衡和生态过程中多种化学元素[主要是碳 (C)、氮 (N)、磷 (P)] 平衡的一门新兴交叉学科^[1-2], 是生态学、生物化学与土壤化学研究领域的新方向, 也是研究土壤-植物相互作用与C、N、P循环的新思路^[3-4], 并在土壤养分循环与限制作用的研究与应用中受到了较多的关注. 生态系统C、N、P等元素的循环是全球变化研究的热点之一, 而且C、N、P等元素之间的循环过程是相互耦合的^[5-6], 所以养分循环的改变将强烈地影响生态系统相关元素的循环过程. 同时, 生态系统元素循环的稳定性不仅会受到相关生物体对元素需求的影响, 也会受到周围环境化学元素平衡状况的影响, 因此研究C、N、P等元素在生态系统中的平衡关系对于认识生态系统元素平衡机制和生态系统如何响应未来全球变化具有重要的意义^[7].

关于生态化学计量学的研究, 近年来在国内得到了迅速发展, 但与国外生态化学计量学研究的广度和深度相比, 国内的研究还相对不足, 且主要是对植物组织的生态化学计量学研究居多^[8-11]. 土壤作为生态系统的重要组成部分, 其中土壤C、N、P不仅是土壤养分的重要组分, 也是土壤养分循环和生态系统健康维护的重要生态因子, 其含量和比值会影响土壤中微生物数量、凋落物分解速率及土壤有机碳和养分的积累^[12]. 土壤生态化学计量学的研究对揭示C、N、P等元素的循环和平衡机制具有重要意义, Han等对中国陆地土壤C、N、P比值的变异性进行了研究^[13], Cleveland等对全球陆地、草地、森林土壤C、N、P比值进行了报道^[14], 湿地生态系统土壤化学计量特征近年在国内得到较多的研究^[15-18]. 灌丛是我国的重要植被之一, 是全国现存森林面积的近2倍^[19], 研究灌丛生态系统生态化学计量特征对管理和保护该植被具有指导意义. 牛得草等对阿拉善荒漠区6种主要灌木叶片C、N、P化学计量比的季节变化进行了研究^[20], 但目前对我国高原灌丛土壤C、N、P生态化学计量学特征的研究仍相对缺乏^[21].

青藏高原是地球上最高的高原, 平均海拔在4 000 m以上, 地域广阔, 面积为 $2\ 572.4 \times 10^3 \text{ km}^2$, 占我国陆地总面积的26.8%^[22], 被誉为地球的“第三极”. 青藏高原海拔较高、空气稀薄、太阳辐射较强、气温较低等地理气候特征使得青藏高原植被和土壤对气候变暖和氮沉降等全球变化极为敏感, 因此被称为全球变化研究的“敏感区”. 正因如此, 青藏高原一直是全球地学、生态学等工作关注的热点地区之一^[23]. 窄叶鲜卑花 (*Sibiraea angustata*) 是青藏高原东部高山灌丛中特有的、具有代表性的物种, 分布于我国青海南部、四川西部、西藏东南部和甘肃东南部, 其范围与青藏高原东部的高寒灌丛、草甸区相当^[24]. 目前, 对窄叶鲜卑花灌丛的研究主要集中在化学成分及药理活性方面^[25-26], 在生态环境

领域的研究已有报道, 吴宁对川西北窄叶鲜卑花灌丛的类型和生物量及其与环境因子的关系进行了研究^[24], 李娇等分析了窄叶鲜卑花灌丛土壤呼吸对不同施氮水平的短期响应^[27], 而尚未从生态化学计量学角度对窄叶鲜卑花灌丛土壤进行研究. 基于此, 本文拟在青藏高原东部窄叶鲜卑花灌丛土壤C、N、P含量调查分析的基础上, 阐明随着土壤剖面深度的改变, 土壤C、N、P含量及其比值的变化范围和水平变异性的关系, 揭示窄叶鲜卑花灌丛土壤生态化学计量特征, C、N、P的相互关系及其平衡状况, 为青藏高原灌丛生态系统的保护和恢复提供重要参考, 对促进生态化学计量学理论的发展和完善将具有重要的意义.

1 材料与方 法

1.1 研究区域与样地概况

研究区域位于青藏高原东部 (96°05'-102°57'E, 29°53'-33°16'N, 海拔3 332-4 212 m), 地处青海南部、四川西部、西藏东南部, 受青藏高原特殊的地理环境和独特的地形地貌影响, 该区域呈现特有的立体气候^[28]. 窄叶鲜卑花灌丛的分布地区属寒温带气候类型, 表现为冬长夏短、气温低、年较差小、日较差大, 雨量充沛、分布不均, 日照充足等气候特点. 年平均气温在5.0 以下, 年降水量在650.0 mm以上, 降水时段主要集中在5-10月; 在11月土壤即开始进入冻土状态, 春秋季节短促且不明显, 冷暖季分明. 植物的生长季一般为5-9月, 年日照时数为1 850-2 700 h.

该区冬长夏短, 植物生长期较短, 该区的植被具有较强的耐寒性, 能够忍耐冬季长达数月的积雪覆盖和冻土环境^[29]. 该区灌丛群落灌木层除了以窄叶鲜卑花为优势物种外, 往往还存在其他伴生灌木物种, 包括山生柳 (*Salix oritrepha* C.K. Schneider)、高山绣线菊 (*Spiraea alpine* Pallas)、金露梅 (*Potentilla fruticosa* Linnaeus)、红花岗岩忍冬 (*Lonicera rupicola.*)、紫丁杜鹃 (*Rhododendron violaceum*)、川滇绣线菊 (*Spiraea schneideriana*)、奇花柳 (*Salix atopanthia*) 等植物. 该区域草本层的物种较多, 主要有羊茅 (*Festuca ovina* Linnaeus)、条纹龙胆 (*Gentiana striata* Maximouicz)、珠芽蓼 (*Polygonum viviparum*)、紫花针茅 (*Stipa purpurea*) 等. 该区海拔高、气温偏低, 低温环境抑制了土壤微生物和酶的活性, 导致有机质分解缓慢, 故该区的土壤有机质高于我国土壤碳密度的平均值^[30-32].

1.2 样品采集

本文的样品是“中国灌丛生态系统的固碳现状、变化和机制”子课题的部分样品, 故样品的采集方法主要参照该课题办公室编制的技术标准和手册, 即根据灌丛在青藏高原东部的分布情况, 采用分层随机抽样方法布设样地, 共选

择16个具有代表性的样地(样地基本信息见表1)进行调查,在每个样地采用GPS仪和地质罗盘测定经纬度、海拔、坡度、坡向等环境指标。为了使所取土壤样品真实可靠而具有代表性,在每个样地设置3个5 m × 5 m重复样方,样方两两边缘之间的最小距离为5 m,最大距离不超过50 m。在每个样方中,沿对角线采用不锈钢土钻采取3钻土样,每钻按0-10、10-20、20-30、30-50、50-70、70-100 cm将各土柱分割后分层混合,每层采取相当于干重100 g的样品装入封口袋,带回实验室,除去样品中大的树根和石砾,并经自然风风干。

1.3 样品的处理和测定方法

将风干过的土壤样品除去细根进行研磨,过60目筛,然后使用冷冻混合球磨仪磨碎,过100目筛,装袋标号。然后采用C/N元素分析仪(PE-2400 II)测定土壤全碳(TC)、全氮(TN)含量,采用酸溶-钼锑抗比色法测定土壤样品全磷(TP)含量。

1.4 计算和统计方法

数据的计算和分析统计主要采用Excel 2007、SPSS17.0等软件,采用Excel 2007软件对原始数据平均值及标准偏差进行计算,采用SPSS 17.0统计软件对不同土层C、N、P的含量及其比值通过单因素方差分析(One-way ANOVA)的LSD法进行显著性检验、对土壤C、N、P含量进行Pearson相关分析。

2 结果与分析

2.1 窄叶鲜卑花灌丛不同土层C、N、P含量的分布特征及相关性

2.1.1 不同土层C、N、P的含量及其分布特征 青藏高原东部窄叶鲜卑花灌丛不同土层C、N、P含量的描述性统计值可见表2,从表2可知,C、N、P含量在土壤0-10cm的均值分别为(73.27 ± 20.25)g/kg、(6.27 ± 1.80)g/kg和(1.13 ± 0.25)g/kg,并且随着土层深度的增加而降低,即都呈现出“倒金字塔”型。尽管3种元素在不同土层具有相似的分布状态,但根据单因素方差分析发现,不同元素含量随土层深度增加而减少的程度并不一致,土壤C、N含量在0-10 cm、10-20 cm、20-30 cm土层的含量值之间均存在显著性差异($P < 0.05$),而在20-30 cm、30-50 cm、50-70 cm、70-100 cm相邻两土层的含量值之间不存在显著性差异($P > 0.05$);土壤P含量在0-10 cm、10-20 cm、20-30 cm和30-50 cm、50-70 cm、70-100 cm相邻两土层的含量值之间不存在显著性差异($P > 0.05$),在20-30 cm、30-50 cm两层之间的差异不大($P = 0.04$)。根据土壤C、N、P含量在不同土层的变异系数值的变化分析可得,土壤C、N含量的变异系数总体上随着土层的深度的加深而增大,土壤C的变异系数从27.63%增至88.84%,土壤N的变异系数从28.63%增至74.26%;而土壤P的变异系数在22.31%至42.48%之

表1 窄叶鲜卑花灌丛样地基本信息

Table 1 Basic information of *Sibiraea angustata* shrub sample plots

样地编号 Plot ID	调查地区 Location	纬度(N) Latitude	经度(E) Longitude	海拔(h/m) Altitude	灌木层高度(h/m) Height	灌木层盖度(r/%) Coverage	坡度(α /°) Slope aspect	坡位 Slope position
1	四川理塘县 Litang, Sichuan	29°53'	100°20'	3980	1.10	80	10	中部 Middle part
2	四川理塘县 Litang, Sichuan	30°05'	100°21'	4064	0.80	60	10	下部 Lower part
3	四川色达县 Sértar, Sichuan	31°51'	100°44'	3535	0.40	70	21	中下部 Mid-lower part
4	四川炉霍县 Luhuo, Sichuan	31°37'	100°14'	3847	0.70	70	20	中部 Middle part
5	四川甘孜县 Garzê, Sichuan	31°27'	99°58'	4212	0.85	75	19	中下部 Mid-lower part
6	四川道孚县 Daofu, Sichuan	30°53'	101°14'	3332	1.20	40	14	中下部 Mid-lower part
7	四川小金县 Xiaojin, Sichuan	31°42'	102°19'	4034	2.20	70	15	中上部 Mid-upper part
8	四川马尔康县 Maerkang, Sichuan	31°54'	102°39'	3709	3.10	70	20	中部 Middle part
9	四川阿坝县 Ngapa, Sichuan	32°43'	102°08'	3813	1.20	60	15	中部 Middle part
10	四川壤塘县 Xiangtang, Sichuan	32°18'	101°04'	3909	1.10	70	15	中部 Middle part
11	四川金川县 Jinchuan, Sichuan	31°32'	101°41'	3748	2.20	50	5	下部 Lower part
12	四川松潘县 Songpan, Sichuan	33°01'	102°57'	3344	1.05	80	0	中上部 Mid-upper part
13	青海久治县 Jiuzhi, Qinghai	33°16'	100°37'	3738	0.90	70	28	下部 Lower part
14	青海玉树市 Yushu, Qinghai	33°02'	96°52'	4053	1.20	65	39	中下部 Mid-lower part
15	青海囊谦县 Nangqian, Qinghai	31°53'	96°53'	4034	1.05	45	35	中下部 Mid-lower part
16	西藏洛隆县 Luolong, Tibet	30°44'	96°05'	4198	0.70	32	10	下部 Lower part

间,其值和土层深度无明显变化规律,进而得知C、N两种元素随土层的加深,其同一土层含量值的变异程度增大,P含量在同一土层的变异程度和土壤深度之间无明显关系。

2.1.2 土壤C、N、P含量的相关性分析 通过SPSS17.0统计分析软件对土壤C、N、P含量进行Pearson相关分析,结果表明,土壤C、N、P两两元素之间的相关性极其显著($P <$

0.01),但是彼此的相关系数存在一定差异,土壤C、N之间的相关系数是0.983,C、P之间的相关系数是0.621,N、P之间的相关系数是0.635。通过拟合线性回归方程(图1)可知,土壤C、N之间不仅相关性极其显著($P <$ 0.01),而且两者之间线性拟合程度很高($R^2 = 0.966$);尽管N与P、C与P两组元素的相关性极其显著($P <$ 0.01),但是它们的线性拟合程度相对

表2 不同土层深度C、N、P含量特征(N=9)

Table 2 Content characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in different soil layers (N=9)

元素指标 Element	土层深度(δ /cm) Soil depth	最小值($w/g\ kg^{-1}$) Minimum	最大值($w/g\ kg^{-1}$) Maximum	平均值($w/g\ kg^{-1}$) Mean	标准差($w/g\ kg^{-1}$) Std. Deviation	变异系数($r/\%$) Coefficient of variability
TC	0-10	31.10	106.66	73.27 a	20.25	27.63
	10-20	25.37	92.66	52.24 b	17.29	33.09
	20-30	19.00	73.13	38.12 c	15.50	40.67
	30-50	6.93	65.38	28.54 cd	19.40	67.97
	50-70	3.58	37.65	15.90 de	11.96	75.24
	70-100	2.19	23.92	7.86 e	6.98	88.84
TN	0-10	2.31	8.79	6.27 a	1.80	28.63
	10-20	1.86	6.81	4.53 b	1.38	30.50
	20-30	1.38	6.33	3.44 c	1.41	40.96
	30-50	0.60	6.31	2.46 cd	1.83	74.26
	50-70	0.45	3.83	1.26 de	0.98	78.13
	70-100	0.44	1.76	0.86 e	0.46	53.90
TP	0-10	0.77	1.52	1.13 a	0.25	22.31
	10-20	0.43	1.61	1.07 ab	0.33	30.28
	20-30	0.54	1.42	1.00 bc	0.27	27.23
	30-50	0.41	1.61	0.77 d	0.32	41.76
	50-70	0.32	1.32	0.69 de	0.29	42.48
	70-100	0.35	0.80	0.53 e	0.16	29.38

TC:全碳;TN:全氮;TP:全磷。在同一元素平均值列中的不同小写字母表示不同土层元素含量有显著性差异($P <$ 0.05)。

TC: total carbon; TN: total nitrogen; TP: total phosphorus. Different small letters in the same column indicate significant difference between soil layers ($P <$ 0.05).

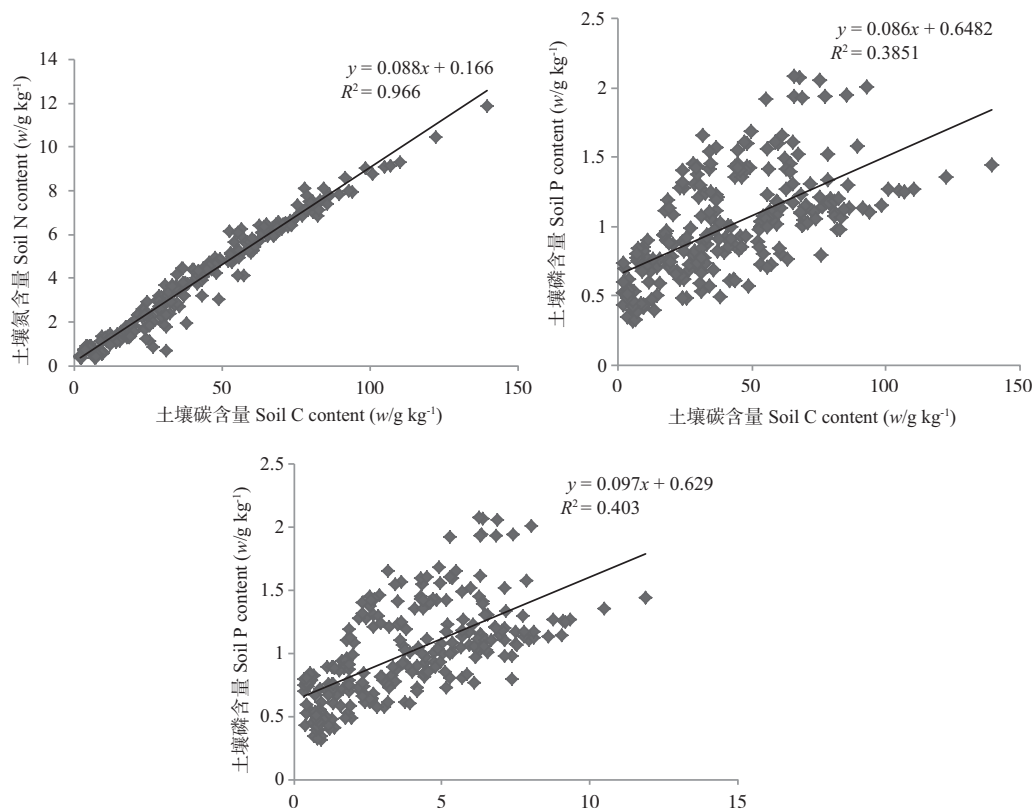


图1 土壤C、N、P含量的相关分析。

Fig. 1 Correlation analysis of carbon, nitrogen and phosphorus content in soil.

表3 不同土层深度C、N、P比值特征 (N=9)

Table 3 Ratio characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in different soil layers (N=9)

元素比 Element	土层深度 (δ /cm) Soil depth	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	标准差 Std. Deviation	变异系数 (r/%) Coefficient of variability
C/N	0-10	10.06	13.45	10.88 a	0.87	8.00
	10-20	9.05	13.66	10.46 ab	1.16	11.09
	20-30	8.24	13.82	10.79 ab	1.57	14.55
	30-50	6.98	16.14	10.93 a	2.54	23.24
	50-70	5.24	17.89	10.52 ab	4.00	38.02
	70-100	4.93	16.71	8.63 b	4.39	50.87
C/P	0-10	34.17	94.98	59.49 a	18.64	31.33
	10-20	27.68	79.63	46.24 b	16.51	35.71
	20-30	16.87	79.64	38.37 bc	18.55	48.35
	30-50	11.74	69.53	31.63 cd	17.64	55.77
	50-70	9.83	52.17	25.17 cd	16.36	65.00
	70-100	3.77	51.43	19.05 d	17.78	93.33
N/P	0-10	3.01	9.25	5.49 a	1.84	33.52
	10-20	2.03	7.04	4.45 ab	1.53	34.38
	20-30	1.56	6.04	3.56 bc	1.50	42.13
	30-50	0.73	5.09	2.96 cd	1.36	45.95
	50-70	0.59	4.66	2.43 cd	1.28	52.67
	70-100	0.55	4.71	2.13 d	1.33	62.44

C/N: 碳氮比值; C/P: 碳磷比值; N/P: 氮磷比值. 在同一元素平均值列中的不同小写字母表示不同土层元素含量有显著性差异 ($P < 0.05$).

C/N: the ratio of carbon and nitrogen; C/P: the ratio of carbon and phosphorus; N/P: the ratio of nitrogen and phosphorus. Different small letters in the same column indicate significant difference between soil layers ($P < 0.05$).

较低 ($R^2 < 0.500$). 故可得知, 土壤C与N整体相关性极其显著, 而N与P、C与P之间的相关性不如C与N. 从图1还可知, 元素在空间尺度上的变化趋势看, C与N含量的变化几乎是同步的, P的变化滞后于C和N.

2.2 窄叶鲜卑花灌丛不同土层C、N、P比值特征

根据青藏高原东部16个样地窄叶鲜卑花灌丛土壤调查测试数据分析得, 窄叶鲜卑花灌丛土壤C/N、C/P和N/P的变化范围分别为4.93-17.89、3.77-91.21和0.55-8.70, 其土壤表层(0-10 cm)的均值分别为 10.88 ± 0.87 、 59.49 ± 18.64 和 5.49 ± 1.84 , 随土层的加深C/N趋于稳定, 而C/P和N/P呈减少的趋势, C/N、C/P和N/P在各土层中的总体均值分别为10.47 \pm 2.56、 38.66 ± 21.66 和 3.67 ± 1.88 , 变异系数分别为24.45%、56.03%和51.23%. 由此可见C/P和N/P存在较大的空间变异性, C/N相对稳定, 空间变异性表现为 $C/N < N/P < C/P$.

青藏高原东部窄叶鲜卑花灌丛不同土层C/N、C/P和N/P的描述性统计值可见表3, 从表3可知, C/N值在不同土层之间的值的变化不大, 其比值主要集中在10-11之间, 而C/P和N/P的比值随着土层的深度加深呈现一定的减少趋势, 在土壤表层(0-30 cm)减少幅度较大, 分别减少了35.50%和35.15%, C/N、C/P和N/P不同土层的变异系数随着土层深度的加深而呈现增加的趋势. C/N、C/P和N/P的这些空间分布特征主要是由C、N、P含量的空间分布情况导致的.

3 讨论与结论

窄叶鲜卑花灌丛生长的海拔较高, 主要集中在海拔3 300-4 300 m之间(表1), 属于青藏高原东部高山灌丛植物, 研究该植被土壤C、N、P含量及其分配格局不仅可以揭示C、N、P元素的循环和平衡机制, 也可以为青藏高原灌丛生态系统的保护和恢复提供重要的参考依据^[17]. 本项研究表明, 窄叶鲜卑花灌丛土壤表层(0-10 cm)C、N、P含量的均值分别为

(73.27 ± 20.25)g/kg、(6.27 ± 1.8)g/kg和(1.13 ± 0.25)g/kg, 普遍高于中国东北样带土壤表层C、N、P的含量^[33], 并且该灌丛土壤C、N、P含量均随土壤深度的增加而降低, C、N含量在土壤表层0-30 cm变化程度较大, 而在50-100 cm土层之间变化减缓; P在整个土层剖面上随土层深度增加而减少的程度都不大, 这与彭佩钦、刘兴华等的研究结果^[34-35]相似. 造成C、N、P含量这种分配格局的主要原因可能与C、N、P的来源和产生机制有关, 土壤C主要来源于动物、植物、微生物残体及其分泌物, 青藏高原土壤N则主要来源于氮沉降、微生物固氮以及有机物质矿化与腐殖化的综合作用, 即C、N首先在土层表面密集, 然后再随水或者其他的介质向下层扩散, 这样就形成了土壤C、N含量从表层到底层越来越低的分布格局. 而自然土壤中的P元素最初大多数来自母岩矿物, 在漫长的土壤形成过程中, 植被吸收土壤中的无机磷形成有机磷, 并通过其残体归还于土壤, 即土壤P元素的来源相对固定, 这也就使得P含量在土壤中的垂直分布相对稳定.

本研究选择了16个样地、48个样方作为研究对象, 研究区域分布较广, 故本文对同一土层不同样点的C、N、P含量分别做变异程度分析. 根据变异系数在土层间的变化规律可知, C、N含量的变异系数总体上随土层加深而增大, 即在土壤表层同一土层不同样点之间的变异程度较小, 而在土壤深层同一土层不同样点之间的变异程度较大, 产生此现象的原因可能是因为该土壤C、N主要来自植被的凋落物和残体, 而此研究只是针对窄叶鲜卑花灌丛植被进行研究, 该类灌丛每年产生的凋落物总量大体相当, 故致使植被输入土壤表层的C、N含量相近, 其变异程度较小; 而由于样地海拔、土壤类型、环境温度、土壤微生物量和活性、地形等环境因子的影响, 其输入土壤深层C、N含量逐渐减少, 且减少的程度因环境因子差异较大而不一样, 故导致其深层土壤同一土层不同样地的C、N含量变异程度较大. 由于P在土壤中的含量相

对稳定,故其变异系数与土层深度之间的关系不明显。对土壤中C、N、P含量进行相关性分析发现,C、N、P两两元素之间的相关性都极其显著($P < 0.01$),但是通过相关系数和回归方程可得,C与N元素之间的整体相关性比N与P、C与P之间的相关性要高,C与N线性拟合程度($R^2 = 0.966$)均高于C、P($R^2 = 0.385$)和N、P($R^2 = 0.403$),即C、N在空间尺度上的变化几乎是同步的,而P的变化滞后于C和N,C、N之间的耦合程度很高。

土壤C、N、P比值不仅是土壤C、N、P矿化作用的指标和平衡特征的重要参数^[36],还是养分限制,C、N、P饱和诊断和预测的指标^[37,38],对植物的生长至关重要。土壤C/N、C/P分别是N、P有效性高低的指标;N/P是养分诊断指标,可用于确定养分限制的阈值^[4]。以C/N比值为例,若C/N比值很大,则在其矿化作用的最初阶段,微生物的同化量会超过矿化作用所提供的有效氮量,可能使植物缺氮的现象更为严重,有机质分解速率较慢;若C/N比值很小,则在其矿化作用之始就能供应给植物所需的有效氮量,有机质分解速率较快^[39]。Tessier和Raynal指出当湿地植物叶片N/P > 16时,存在P限制,当叶N/P < 14时,存在N限制^[38]。而关于土壤C、N、P比值指示作用的有效范围目前还有待进一步研究^[4]。通过对窄叶鲜卑花灌丛土壤C、N、P比值分析得到,土壤整体C/N、C/P和N/P的均值分别为 10.47 ± 2.56 、 38.66 ± 21.66 和 3.67 ± 1.88 ,变异系数分别为24.45%、56.03%和51.23%。空间变异性表现为 $C/N < N/P < C/P$,这与肖焯等人对吉林东部山地沼泽湿地土壤的研究结果^[40]相似。由于C、N之间的线性拟合程度很高,故其C/N比值相对稳定且接近线性回归方程 $y = 10.89x - 0.437$ ($R^2 = 0.966$,y为碳含量,x为氮含量)的斜率;C/P和N/P的比值随着土层的深度加深而减少;C/N、C/P和N/P不同土层的变异系数随着土层深度的加深而增加,这一结果可能是受到C、N含量的变异系数随土层加深而增加和P含量在不同土层之间相对稳定的交叉作用而引起的。

目前,已有在较大尺度范围内对不同类型土壤生态化学计量学特征的研究,本文对比了青藏高原东部窄叶鲜卑花灌丛表层(0-10 cm)土壤C/N、C/P和N/P与其他类型土壤的异同(表4),主要表现为土壤C/N比值略低于全球陆地、草地、森林及中国陆地的平均值,而C/P、N/P比值低于全球陆地、草地和森林,高于中国陆地,可得N、P的有效性略高于全球陆地、草地和森林。Elser等用生态化学计量学方法分析

表4 不同类型土壤生态化学计量学(质量比)特征

Table 4 Ecological stoichiometry (mass ratios) characteristics in different soil types

土壤类型 Soil type	C/N	C/P	N/P	文献 References
全球陆地土壤 Global land soil layer (0-10 cm)	12.3	72.0	5.9	[14]
中国陆地土壤 Chinese landsoil layer (0-10 cm)	12.3	52.7	3.9	[13]
全球草地土壤 Global grassland soil layer (0-10 cm)	11.8	64.3	5.6	[14]
全球森林土壤 Global forestsoil layer (0-10 cm)	12.4	81.9	6.6	[14]
窄叶鲜卑花灌丛土壤 <i>Sibiraea angustata</i> shrub soil layer (0-10 cm)	10.9	59.5	5.5	本研究 This study

认为全球陆地、海洋和淡水生态系统均是受到磷的限制,而青藏高原窄叶鲜卑花灌丛土壤N/P比值与全球草地和陆地的相近^[41],从而可知,随着该植被的生长和演替,该灌丛生态系统可能会在一定程度上受到磷的限制。N/P比值是当前限制性养分判断的重要指标之一,但因不同物种的生态策略和适应性不一,为了探索不同物种在环境中养分限制情况,除了分析其N/P比外,还应结合物种的施肥试验作进一步的诊断^[2]。

本文只针对青藏高原东部窄叶鲜卑花灌丛土壤C、N、P生态化学计量学进行研究,得到该灌丛土壤C、N比值相对稳定,但由于土壤C、N等元素比值在不同植被和土壤类型中存在相当大的变异性^[42],为了加强不同生态系统类型植物和土壤C、N等元素比值空间变异性研究,深入探讨土壤C、N等元素比值特征的空间格局和调控因素,更加准确地模拟C、N循环过程和反映土壤C、N、P等元素的平衡机制,还应构建不同植被和土壤类型C、N、P等元素比值的数据库。

参考文献 [References]

- 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): 141-153 [Zeng DH, Chen GS. Ecological stoichiometry: a science to explore the complexity of living systems [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2005, 29 (6): 141-153]
- 曾冬萍, 蒋利玲, 曾从盛, 王维奇, 王纯. 生态化学计量学特征及其应用研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33 (18): 5484-5492 [Zeng DP, Jiang LL, Zeng CS, Wang WQ, Wang C. Reviews on the ecological stoichiometry characteristics and its applications [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, 33 (18): 5484-5492]
- Michaels A. The ratios of life [J]. *Science*, 2003, 300: 906-907
- 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, 28 (8): 3937-3947 [Wang SQ, Yu GR. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, 28 (8): 3937-3947]
- Sun P, Li X, Gong X, Liu Y, Zhang X, Wang L. Carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometry of *Lateolabrax maculatus* and *Acanthogobius ommaturus* in the Estuary of Yangtze River, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, 34 (4): 196-203
- Soh S, Makoto S, Antonie D M, Shigeru A, Shinya F. Effects of vegetation on soil microbial C, N, and P dynamics in a tropical forest and savanna of Central Africa [J]. *Appl Soil Ecol*, 2015, 87 (1): 91-98
- 邵梅香, 覃林, 谭玲. 我国生态化学计量学研究综述[J]. 安徽农业科学, 2012, 40 (11): 6918-6920 [Shao MX, Tan L., Tan L. Review of researches on ecological stoichiometry in China [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2012, 40 (11): 6918-6920]
- 常云妮, 钟全林, 程栋梁, 徐朝斌, 胡波, 张治. 尤溪天然米槠林植物碳氮磷的化学计量特征及其分配格局[J]. 植物资源与环境学报, 2013, 22 (3): 1-10 [Chang YN, Zhong QL, Cheng DL, Xu CB, Hu B., Zhang Y. Stoichiometric characteristics of C, N, P and their distribution pattern in plants of *Castanopsis carlesii* natural forest in Youxi [J]. *J Plant Resour Environ*, 2013, 22 (3): 1-10]
- 张珂, 何明珠, 李新荣, 谭会娟, 高艳红, 李刚, 韩国君, 吴杨杨. 阿拉善荒漠典型植物叶片碳、氮、磷化学计量特征[J]. 生态学报, 2014, 34 (22): 6538-6547 [Zhang K, He MZ, Li XR, Tan HJ, Gao YH, Li G, Han GJ, Wu YY. Foliar carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of

- typical desert plants across the Alashan Desert [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, **34** (22): 6538-6547]
- 10 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[J]. *山地学报*, 2014, **32** (4): 467-474 [Hong JT, Wu JB, Wang XD. Root C:N:P stoichiometry of *Stipa purpurea* in alpine steppe on the Northern Tibet [J]. *Mount Res*, 2014, **32** (4): 467-474]
 - 11 Rong Q, Liu J, Cai Y, Lu Z, Zhao Z, Yue W, Xia J. Leaf carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of *Tamarix chinensis* Lour. in the Laizhou Bay coastal wetland, China [J]. *Ecol Eng*, 2015, **76**: 57-65
 - 12 任书杰, 曹明奎, 陶波, 李克让. 陆地生态系统氮状态对碳循环的限制作用研究进展[J]. *地理科学进展*, 2006, **25** (4): 58-67 [Ren SJ, Cao MK, Tao B., Li KR. The effects of nitrogen limitation on terrestrial ecosystem carbon cycle: a review [J]. *Prog Geogr*, 2006, **25** (4): 58-67]
 - 13 Han Q, Chen G, Zhang C, Melillo J, Hall CS. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data [J]. *Biogeochemistry*, 2010, **98** (3): 139-151
 - 14 Cleveland C, Liptzin D. C:N:P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? [J]. *Biogeochemistry*, 2007, **85** (3): 235-252
 - 15 王维奇, 全川, 贾瑞霞, 曾从盛. 不同淹水频率下湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J]. *水土保持学报*, 2010, **24** (3): 238-242 [Wang WQ, Tong C., Jia RX, Zeng CS. Ecological stoichiometry characteristics of wetland soil carbon, nitrogen and phosphorus in different water-flooded frequency [J]. *J Soil Water Conserv*, 2010, **24** (3): 238-242]
 - 16 王维奇, 王纯, 曾从盛, 全川. 闽江河口不同河段芦苇湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J]. *生态学报*, 2012, **32** (13): 4087-4093 [Wang WQ, Wang C., Zeng CS, Tong C. Soil carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometry of *Phragmites australis* wetlands in different reaches in Minjiang River estuary [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, **32** (13): 4087-4093]
 - 17 王维奇, 曾从盛, 钟春棋, 全川. 人类干扰对闽江河口湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量学特征的影响[J]. *环境科学*, 2010, **31** (10): 2411-2416 [Wang WQ, Zeng CS, Zhong CQ, Tong C. Effect of human disturbance on ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus in Minjiang river Estuarine wetland [J]. *Environ Sci*, 2010, **31** (10): 2411-2416]
 - 18 Zhang Z, Lu X, Song X, Guo Y, Xue Z. Soil C, N and P stoichiometry of *Deyeuxia angustifolia* and *Carex lasiocarpa* wetlands in Sanjiang Plain, Northeast China [J]. *J Soil Sedim*, 2012, **12** (9): 1309-1315
 - 19 胡会峰, 王志恒, 刘国华, 傅伯杰. 中国主要灌丛植被碳储量[J]. *植物生态学报*, 2006, **30** (4): 539-544 [Hu HF, Wang ZH, Liu GH, Fu BJ. Vegetation carbon storage of major shrublands in China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2006, **30** (4): 539-544]
 - 20 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[J]. *植物生态学报*, 2013, **37** (4): 317-325 [Niu DC, Li X., Jiang SG, Chang PJ, Fu H. Seasonal variations of leaf C:N:P stoichiometry of six shrubs in desert of China's Alxa Plateau [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2013, **37** (4): 317-325]
 - 21 杨阳, 刘秉儒, 杨新国, 韩丛丛. 荒漠草原中不同密度人工柠条灌丛土壤化学计量特征[J]. *水土保持通报*, 2014, **34** (5): 67-73 [Yang Y., Liu BR, Yang XG, Han CC. Soil stoichiometry characteristics of artificial *Caragana Korshinskii* shrubs with different density in desert steppe [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2014, **34** (5): 67-73]
 - 22 张镜铨, 李炳元, 郑度. 论青藏高原范围与面积[J]. *地理研究*, 2002, **21** (1): 1-8 [Zhang LL, Li BY, Zhang D. A discussion on the boundary and area of the Tibetan Plateau in China [J]. *Geo Res*, 2002, **21** (1): 1-8]
 - 23 田玉强, 欧阳华, 徐兴良, 宋明华, 周才平. 青藏高原土壤有机碳储量与密度分布[J]. *土壤学报*, 2008, **45** (5): 933-942 [Tian YQ, Ouyang H., Xu XL, Song MH, Zhou CP. Distribution characteristics of soil organic carbon storage and density on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Acta Pedol Sin*, 2008, **45** (5): 933-942]
 - 24 吴宁. 川西北窄叶鲜卑花灌丛的类型和生物量及其与环境因子的关系[J]. *植物学报*, 1998, **40** (9): 860-870 [Wu L. The community types and biomass of *Sibiraea angustata* scrub and their relationship with environmental factors in northwestern Sichuan [J]. *Acta Bot Sin*, 1998, **40** (9): 860-870]
 - 25 姚莉, 鞠洋. 窄叶鲜卑花促消化作用的实验研究[J]. *中国中西医结合消化杂志*, 2009, **17** (6): 376-378 [Yao L., Ju Y. Effects of *Sibiraea angustata* on digestive system [J]. *Chin J Integr Trad West Med Dig*, 2009, **17** (6): 376-378]
 - 26 王章伟, 徐向红, 陈笑天, 庾石山, 刘宏栋, 林利光, 李斌. 窄叶鲜卑花地上部分化学成分研究[J]. *中药材*, 2014, **37** (1): 57-60 [Wang ZW, Xu XH, Chen XT, Yu SS, Liu HD, Lin LG, Li B. Chemical constituents from the aerial part of *Sibiraea angustata*[J]. *J Chin Med Mater*, 2014, **37** (1): 57-60]
 - 27 李娇, 尹春英, 周晓波, 魏宇航, 高巧, 刘庆. 施氮对青藏高原东缘窄叶鲜卑花灌丛土壤呼吸的影响[J]. *生态学报*, 2014, **34** (19): 5558-5569 [Li J., Yin CY, Zhou XB, Wei YH, Qiao G., Liu Q. Effects of nitrogen addition on soil respiration of *Sibiraea angustata* shrub in the eastern margin of Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, **34** (19): 5558-5569]
 - 28 张新时. 西藏植被的高原地带性[J]. *植物学报*, 1978, **20** (2): 140-149 [Zhang XS. The Plateau zonality of vegetation in Xizang [J]. *Acta Bot Sin*, 1978, **20** (2): 140-149]
 - 29 张发会, 何飞, 何亚平, 樊华, 降廷伦. 川西生物多样性的影响因素及其保护对策[J]. *四川林业科技*, 2008, **29** (6): 46-51 [Zhang FH, He F., He YP, Fan H., Jiang TL. The influencing factors and protection of biodiversity in western Sichuan [J]. *J Sichuan For Sci Technol*, 2008, **29** (6): 46-51]
 - 30 高巧, 阳小成, 尹春英, 刘庆. 四川省甘孜藏族自治州高寒矮灌丛生物量分配及其碳密度的估算[J]. *植物生态学报*, 2014, **38** (4): 355-365 [Gai Q., Yang XC, Yin CY, Liu Q. Estimation of biomass allocation and carbon density in alpine dwarf shrubs in Garzê Zangzu Autonomous Prefecture of Sichuan Province, China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2014, **38** (4): 355-365]
 - 31 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳储量[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2003, **33** (1): 72-80 [Li KR, Wang SQ, Cao MK. Chinese vegetation and soil carbon storage [J]. *Sci China (Ser D)*, 2003, **33** (1): 72-80]
 - 32 吴雅琼, 刘国华, 傅伯杰, 郭玉华. 青藏高原土壤有机碳密度垂直分布研究[J]. *环境科学学报*, 2008, **33** (2): 362-367 [Wu YQ, Liu GH, Fu BJ, Guo YH. Study on the vertical distribution of soil organic carbon density in the Tibetan Plateau [J]. *Acta Sci Circumst*, 2008, **33** (2): 362-367]
 - 33 王淑平, 周广胜, 吕育财, 邹建军. 中国东北样带(NECT)土壤碳、氮、磷的梯度分布及其与气候因子的关系[J]. *植物生态学报*, 2002, **26** (5): 513-517 [Wang SP, Zhou GS, Lu YC, Zhou JJ. Distribution of soil carbon, nitrogen and phosphorus along northeast China transect (NECT) and their relationships with climatic factors [J]. *Acta Phyt Sin*, 2002, **26** (5): 513-517]

- 34 彭佩钦, 张文菊, 董成立, 仇少君, 张文超. 洞庭湖湿地土壤碳、氮、磷及其与土壤物理性状的关系[J]. 应用生态学报, 2005, **16** (10): 1872-1878 [Peng PQ, Zhang WJ, Tong CL, Qiu SJ, Zhang WC. Soil C, N and P contents and their relationships with soil physical properties in wetlands of Dongting Lake floodplain [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2005, **16** (10): 1872-1878]
- 35 刘兴华, 陈为峰, 段存国, 王凯, 王海翠. 黄河三角洲未利用地开发对植物与土壤碳、氮、磷化学计量特征的影响[J]. 水土保持学报, 2013, **27** (2): 204-208 [Liu XH, Chen WF, Duan CG, Wang K., Wang HC. Effect of exploitation of unutilized land on ecological stoichiometry characteristics of plants and soil carbon, nitrogen and phosphorus in the Yellow River Delta [J]. *J Soil Water Conserv*, 2013, **27** (2): 204-208]
- 36 Dise N, Matzner E, Forsius M. Evaluation of organic horizon C:N ratio as an indicator of nitrate leaching in conifer forests across Europe [J]. *Environ Poll*, 1998, **102** (1): 453-456.
- 37 Gusewell S, Koerselman W, Verhoeven J. Biomass N:P ratios as indicators of nutrient limitation for plant populations in wetlands [J]. *Ecol Appl*, 2003, **13** (2): 372-384
- 38 Tessier J, Raynal D. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation [J]. *J Appl Ecol*, 2003, **40**: 523-534
- 39 李玉强, 赵哈林, 赵学勇, 张铜会, 移小勇, 左小安. 科尔沁沙地沙漠化过程中土壤碳氮特征分析[J]. 水土保持学报, 2005, **19** (5): 75-78 [Li YQ, Zhao HL, Zhao XY, Zhang TH, Yi XY, Zuo XA. Characteristics of soil carbon and nitrogen during desertification process in Horqin Sandy Land [J]. *J Soil Water Conserv*, 2005, **19** (5): 75-78]
- 40 肖焱, 商丽娜, 黄志刚, 张文广, 薛振山, 张仲胜, 吕宪国. 吉林东部山地沼泽湿地土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量学特征[J]. 地理科学, 2014, **34** (8): 994-1001 [Xiao Y., Shang LN, Huang ZG, Zhang WG, Xue ZS, Zhang ZS, Lu XG. Ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorous in mountain swamps of eastern Jilin province [J]. *Sci Geo Sin*, 2014, **34** (8): 994-1001]
- 41 Elser J, Bracken M, Cleland E, Gruner D, Harpole W, Hillebrand H, Ngai J, Sealoom E, Shrin J, Smith J. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems [J]. *Ecol Lett*, 2007, **10** (12): 1135-1142
- 42 王建林, 钟志明, 王忠红, 陈宝雄, 余成群, 胡兴祥, 沈振西, 大次卓嘎, 张宪洲. 青藏高原高寒草原生态系统土壤碳氮比的分布特征[J]. 生态学报, 2014, **34** (22): 6678-6691 [Wang JL, Zhong ZM, Wang ZH, Chen BX, Yu CQ, Hu XX, Shen ZX, Daci ZG, Zhang XZ. Soil C/N distribution characteristics of alpine steppe ecosystem in Qinhai-Tibetan Plateau [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, **34** (22): 6678-6691]