

西藏高原高寒草原生态系统 植被 C/N 值的分布特征及其影响因素

王建林¹, 钟志明², 王忠红¹, 张宪洲², 沈振西², 胡兴祥¹

(1. 西藏农牧学院植物科学学院, 西藏 林芝 860000; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 以西藏高原高寒草原生态系统的 4 个自然地带(高山草原、高山灌丛草甸、山地半荒漠与荒漠以及山地灌丛草原)的 19 个草地型植被为研究对象,采用野外调查与室内分析相结合的方法,对高寒草原生态系统植被 C/N 值的分布特征及其影响因素进行了研究。结果表明:西藏高原高寒草原植被 C/N 值总体上呈现出东西部低而中间高的态势以及斑块状交错分布的格局。不同自然地带间和不同草地型间植被地上部分和根系的 C/N 值有明显差异,且地上部分的 C/N 值均大于根系。19 个草地型植被地上部分的平均 C/N 值为 34.17,变异系数为 35.87%;根系的平均 C/N 值为 29.58,变异系数为 40.02%。4 个自然地带植被地上部分的平均 C/N 值为 31.98,变异系数为 13.82%;根系的平均 C/N 值为 31.86,变异系数为 16.92%。回归分析结果显示:植被地上部分 C/N 值与地上部生物量以及土壤全 N 和全 K 含量呈显著正相关、与植被高度呈显著负相关;根系 C/N 值与海拔和 20~30 cm 土壤容重呈显著正相关、与年均降水量和年均蒸发量呈显著负相关,这些因子均为影响西藏高原高寒草原植被 C/N 值的关键环境因子。总体上看,地理因子、气候因子和土壤物理因子对西藏高原高寒草原生态系统植被 C/N 值的影响不显著,而植被因子和土壤化学因子则对其有显著影响。

关键词: 西藏高原; 高寒草原; 草地型; 植被 C/N 值; 分布特征; 影响因素

中图分类号: Q142; Q948.1 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2013)04-0020-09

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2013.04.03

Distribution characteristics and its influence factors of vegetation C/N value of alpine steppe ecosystem in Tibetan Plateau WANG Jianlin¹, ZHONG Zhiming², WANG Zhonghong¹, ZHANG Xianzhou², SHEN Zhenxi², HU Xingxiang¹ (1. College of Plant Science, Tibet Institute of Agriculture and Animal Husbandry, Linzhi 860000, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2013, 22(4): 20-28

Abstract: Taking vegetation of nineteen grassland types of four natural transects (alpine grassland, alpine shrub and meadow, mountain semidesert and desert, mountain shrub steppe) in alpine steppe ecosystem in Tibetan Plateau as research objects, distribution characteristics of vegetation C/N value and its influence factors in alpine steppe ecosystem were studied by means of combining field investigation and laboratory analysis. The results show that the vegetation C/N value of alpine steppe ecosystem in Tibetan Plateau appears generally a tendency with lower in east and west parts and higher in the middle part of Tibetan Plateau, and a patch distribution pattern. There are obvious differences in C/N value of above-ground part and root among different natural transects and different grassland types, and C/N value in above-ground part is higher than that in root. Average C/N value in above-ground part of vegetation of nineteen grassland types is 34.17 with coefficient of variation (CV) of 35.87%, and that in root is 29.58 with CV of 40.02%. While that in above-ground part of vegetation of four natural transects is 31.98 with CV of 13.82%, and that in root is 31.86 with a CV of 16.92%. Regression analysis result shows that C/N value in above-ground part of vegetation has a significant positive correlation with above-

ground part biomass, total N and total K contents in soil, and has a significant negative correlation with vegetation height; C/N value in root has a significant positive correlation with altitude and soil bulk density in 20–30 cm soil depth, and has a significant negative correlation with mean annual precipitation and mean annual evaporation. And these factors are the key environmental factors influencing vegetation C/N value of alpine steppe ecosystem in Tibetan Plateau. General, the influence of geographical, climatic and soil physical factors on vegetation C/N value of alpine steppe ecosystem in Tibetan Plateau is not significant, while that of vegetation and soil chemical factors is significant.

Key words: Tibetan Plateau; alpine steppe; grassland type; vegetation C/N value; distribution characteristics; influence factor

作为植物的基本营养元素,碳(C)和氮(N)在植物生长和生理过程中发挥着重要作用,且彼此关系密切^[1-4]。其中,C是构成植物体内干物质的最主要元素,而N则与植物的光合作用和细胞生长分裂等重要生理活动有关^[4]。作为重要的生理指标,C/N比反映了植物的生长速率^[5-6],并与植物对N的利用效率有关^[7]。近年来,生态化学计量学的发展为研究上述问题提供了有力工具,并强调活有机体主要组成元素(特别是C、N)的关系。应用化学计量学方法研究C/N的区域分布规律已成为当前的研究热点之一^[8]。

西藏高原是地球上面积最大、海拔最高的高原,平均海拔在4 000 m以上,被誉为地球“第三极”。西藏高原地势高亢、空气稀薄、紫外线辐射强度大,对亚洲甚至北半球的大气环流和碳平衡等均有重要影响,使得高原植被和土壤对气候变化极为敏感,因此西藏高原也被称为全球气候变化的敏感区,也使西藏高原高寒草原生态系统在全球气候变化研究中占有特殊地位,为研究不同地理气候条件下生态系统结构和功能提供了天然“实验室”。所以该区域一直是全球相关研究者关注的热点地区。

目前,围绕西藏高原土壤的碳储量^[9]、CO₂排放^[10]、有机质周转^[11]以及氮循环^[12]等方面开展了大量的研究工作,但目前涉及整个高原跨不同植被带(不同自然地带)高寒草原生态系统植被C/N分布的研究报道很少。为此,作者通过对西藏高原高寒草原生态系统植被C/N值的研究,揭示该区域植被C/N值的空间分布特征及其影响因素,以期为研究西藏高原对气候变化响应的区域差异提供科学依据。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

研究区域为西藏黑阿(那曲—阿里)、青藏(拉

萨—青海)、新藏(拉萨—新疆)公路沿线没有受人类活动干扰的高寒草原区。研究区年均温-4℃~6℃,年均降水量50~500 mm,跨越高山灌丛草甸、山地灌丛草原、山地半荒漠与荒漠以及高山草原4个自然地带。植被包含昆仑针茅(*Stipa roborowskyi* Roshev.)-窄叶薹草(*Carex montis-everestii* Kükenth.)、紫花针茅(*Stipa purpurea* Griseb.)+藏沙蒿(*Artemisia wellbyi* Hemsl. et Pears.)、紫花针茅+矮火绒草[*Leontopodium nanum* (Hook. f. et Thoms. ex C. B. Clarke) Hand. -Mazz.]、青藏薹草(*Carex moorcroftii* Falc. ex Boott)、紫花针茅+干生薹草(*Carex aridula* V. Krecz.)、固沙草[*Orinus thoroldii* (Stapf ex Hemsl.) Bor]+劲直黄耆(*Astragalus strictus* Graham ex Bentham)、紫花针茅+杂类草、青藏薹草+紫花针茅、紫花针茅、固沙草-藏薹草(*Carex thibetica* Franch.)-紫花针茅、藏东蒿(*Artemisia vexans* Pamp.)、紫花针茅+藏北蒿(*Kobresia littledalei* C. B. Clarke)、拉萨小檗(*Berberis hemsleyana* Ahrendt)-紫花针茅+白草(*Pennisetum centrasiatricum* Tzvel.)、羽柱针茅[*Stipa subsessiliflora* var. *basiplumosa* (Munro ex Hook. f.) P. C. Kuo et Y. H. Sun]-紫花针茅-禾草、紫花针茅+沙生针茅(*Stipa glareosa* P. Smirn.)、紫花针茅-矮生蒿草[*Kobresia humilis* (C. A. Mey. ex Trautv.) Sergiev]-藏薹草、金露梅(*Potentilla fruticosa* Linn.)-青藏薹草+紫花针茅、紫花针茅+羽柱针茅和紫花针茅+固沙草等19个高寒草原草地型^[13],其中:紫花针茅+干生薹草、固沙草-藏薹草-紫花针茅、羽柱针茅-紫花针茅-禾草、固沙草+劲直黄耆、藏东蒿、昆仑针茅-窄叶薹草、金露梅-青藏薹草+紫花针茅、紫花针茅-矮生蒿草-藏薹草以及拉萨小檗-紫花针茅+白草9个草地型属于山地灌丛草原带,紫花针茅+杂类草以及青藏薹草+紫花针茅2个草地型属于高山灌丛草甸带,紫花针茅+羽柱针茅、紫花针茅+藏北蒿、紫花针茅+藏沙蒿、紫花针茅+沙生针茅

以及紫花针茅+固沙草5个草地型属于山地半荒漠与荒漠带,青藏藁草、紫花针茅以及紫花针茅+矮火绒草3个草地型属于高山草原带。

1.2 研究方法

1.2.1 样点设置与样品采集

于2011年7至8月间,沿黑阿、青藏和新藏公路沿线设置54个采样点,所有采样点的地理位置如下:1)隆子县扎西康(N28.23°,E91.95°);2)康马县嘎拉(N28.32°,E89.48°);3)聂拉木县吉隆(N28.47°,E86.15°);4)聂拉木县乃隆(N28.64°,E86.44°);5)定日县白坝(N28.60°,E87.08°);6)曲松县邛多江(N28.77°,E90.12°);7)浪卡子县白地(N29.01°,E90.40°);8)羊卓雍湖畔(N29.18°,E90.55°);9)羊卓雍湖畔(N29.18°,E90.58°);10)羊卓雍湖畔(N29.18°,E90.60°);11)羊卓雍湖畔(N29.18°,E90.60°);12)羊卓雍湖畔(N29.18°,E90.80°);13)萨嘎县麦岗(N29.32°,E85.27°);14)墨竹工县日多(N29.76°,E92.37°);15)昂仁县桑桑(N29.43°,E86.70°);16)昂仁县尼日勒(N29.80°,E85.75°);17)林周县松盘(N29.98°,E91.27°);18)仲巴县帕羊(N30.10°,E83.47°);19)当雄县羊八井(N30.18°,E90.60°);20)措勤县塔丝(N30.28°,E85.30°);21)措勤县郊(N31.10°,E84.98°);22)当雄县城(N30.50°,E91.01°);23)当雄县城(N30.50°,E91.06°);24)当雄县城(N30.51°,E91.07°);25)普兰马攸木拉山(N30.60°,E80.53°);26)普兰拉昂错(N30.68°,E81.30°);27)普兰马攸木拉山(N30.95°,E82.25°);28)纳木措(N30.70°,E90.88°);29)纳木措(N30.75°,E91.07°);30)噶尔县门士(N31.37°,E80.53°);31)噶尔县莫落江(N31.45°,E80.52°);32)噶尔县城(N32.56°,E80.03°);33)班戈县舍库(N31.12°,E90.57°);34)班戈县城(N31.40°,E90.05°);35)班戈县城(N31.40°,E90.05°);36)班戈县城(N31.40°,E91.05°);37)班戈县城(N31.42°,E90.00°);38)班戈县城(N31.42°,E90.00°);39)那曲县错鄂湖畔(N31.51°,E91.36°);40)安多县帮爱乡(N31.67°,E91.83°);41)札达县阿依木拉山(N31.87°,E80.08°);42)札达县阿依木拉山(N31.88°,E80.08°);43)改则县洞措(N32.08°,E84.80°);44)改则县洞措(N32.10°,E84.78°);45)革吉县小盐湖(N32.23°,E82.23°);46)革吉县帮巴(N32.28°,E81.23°);47)革吉县盐湖(N32.52°,

E82.45°);48)日土县班公措(N33.43°,E79.77°);49)日土县班公措(N33.43°,E79.77°);50)班戈县屋刻亥(N31.47°,E89.82°);51)那曲县那莫切(N34.57°,E91.57°);52)岗巴县东鸡山(N28.73°,E88.75°);53)浪卡子县工布学(N28.63°,E91.07°);54)措美县哲古乡(N28.53°,E91.63°)。其中,1~18、52、53和54号采样点属于山地灌丛草原,19、22、23、24、39和40号采样点属于高山灌丛草甸,20、21、28、29、33~38、43~45、47、50和51号采样点属于高山草原,25~27、30~32、41、42、46、48和49号采样点属于山地半荒漠与荒漠。

在每个采样点设置面积1 m×1 m的样方6个,先在每个样方中用收获法收集植物的地上部分,再在该样方中随机设1个面积25 cm×25 cm的小样方挖取土柱,土柱深度40 cm,并按10 cm间隔分层,将分层土柱装入80目尼龙袋中,将泥沙冲洗干净后用镊子拣取所有根系装入布袋中;同时,在该样方中再设置另1个面积25 cm×25 cm的小样方,挖取土壤剖面,用机械采样法分别采集0~10、10~20、20~30和30~40 cm土层的土壤样品;同时调查每个样方中的植物种数、优势种、平均高度和平均盖度,并用海拔仪测定海拔。另外,收集各样点相邻气象站的年均气温与年均降水量等气象资料。

1.2.2 测定方法

将采集的植物地上部分和根系样品置于80℃的恒温箱中干燥至质量恒定,分别采用半微量凯氏法^{[14]375-376}、重铬酸钾氧化-外加热法^{[14]376-377}和双指示剂滴定法^{[14]399}测定植物地上部分(叶和茎)以及0~10、10~20、20~30和30~40 cm土层中植物根系的全N、有机C和无机C含量。

采用酒精燃烧法测定0~10、10~20、20~30和30~40 cm土层的土壤含水量,用环刀法同步测定土壤容重。所有土壤样品风干后磨细并过1 mm筛,用于相关土壤化学指标测定。其中,土壤全N含量采用半微量凯氏法^{[14]375-376}测定,速效N含量采用蒸馏法^{[14]78-82}测定,全P含量采用钼锑抗比色法^{[14]97-101}测定,速效P含量采用碳酸氢钠法^{[14]105-108}测定,全K和速效K含量采用原子吸收分光光度法^{[14]113-115}测定,土壤有机质、总有机C、总碳水化合物和活性C含量均采用重铬酸钾氧化-外加热法^{[14]376-377}测定,土壤pH值采用电位法^{[14]146-156}测定,水解性C和水溶性C含量采用蒽酮法^{[14]132-136}测定,总无机C含量用双指示剂滴定法^{[14]399}测定。

1.3 数据处理

采用逆距离权重法 (inverse distance weighting, IDW) 法对所有样点的植物地上部分和根系 C/N 值 (为全 C 和全 N 的含量比值) 的平均数据作空间分布图。作图时, 设平面上分布一系列离散点, 已知其坐标和值为 $X_i, Y_i, Z_i (i=1, 2, \dots, n)$, 通过距离加权值求 Z 点值公式^[15]:

$$Z = \left[\sum_{i=1}^n \frac{z_i}{d_i^2} \right] / \left[\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2} \right]; d_i^2 = (X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2$$

式中, Z 为待估计的植被 C/N 栅格值, z_i 为第 $i (i=1, 2, \dots, n)$ 个采样点的植被 C/N 值, n 为用于植被 C/N 插值的采样点个数, d_i 为插值点到第 i 个采样点的距离。

同时, 采用单因素方差分析和最小显著差异法比较所有样点植物地上部分和根系 C/N 平均值在不同数据组间的差异。此外, 因土壤理化性质、气象因子、植被因子和地理属性对高寒草原土壤及植被 C 和 N 含量均有明显影响, 因而, 用逐步回归分析法分别建立所有样点植物地上部分和根系 C/N 值与地理、气

候、植被、土壤物理和土壤化学因子之间的相关方程。

2 结果和分析

2.1 植被 C/N 值的分布特征

2.1.1 植被 C/N 值的水平分布格局 西藏高原高寒草原植被 C/N 值的水平分布格局见图 1。西藏高原高寒草原植被 C/N 值的水平分布有 2 个特点: 一是整体呈现出中间低而东西部高的态势; 二是呈现出斑块状交错分布的格局。植被 C/N 值的高值区主要集中在以扎日南木错和洞措为核心的藏北高原腹地, 而在马攸木拉山以西则为植被 C/N 值的低值区。

2.1.2 不同草地型植被 C/N 值的分布特征 西藏高原高寒草原不同草地型植被地上部分和根系的 C/N 值见表 1。由表 1 可知: 植物地上部分 C/N 平均值为 34.17, 变异系数达到 35.87%。从昆仑针茅-窄叶薹草、紫花针茅+矮火绒草、青藏薹草+紫花针茅、紫花针茅+干生薹草、青藏薹草以及藏东蒿草地型, 到固沙草+劲直黄芪、金露梅-青藏薹草+紫花针茅、紫花针

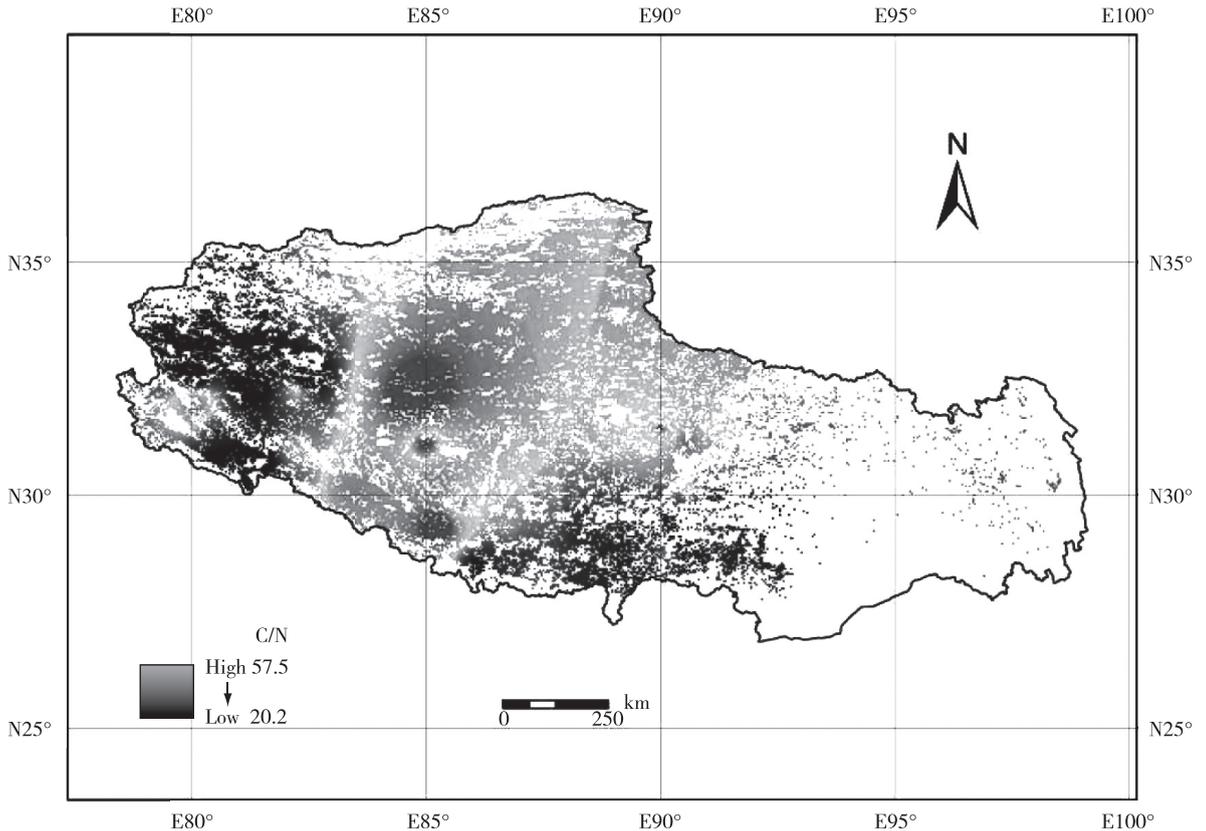


图 1 西藏高原高寒草原不同草地型植被 C/N 值的水平分布格局

Fig. 1 Horizontal distribution pattern of C/N value in vegetation of different grassland types of alpine steppe in Tibetan Plateau

表 1 西藏高原高寒草原不同草地型植被地上部分和根系的 C/N 值比较 ($\bar{X} \pm SE$)

Table 1 Comparison of C/N value in above-ground part and root of vegetation among different grassland types of alpine steppe in Tibetan Plateau ($\bar{X} \pm SE$)

草地型 ¹⁾ Grassland type ¹⁾	地上部分 C/N 值 C/N value in above-ground part	根系 C/N 值 C/N value in root
AV	34.764 2±6.388 7	24.534 5±8.804 3
OT+AS	33.125 5±3.060 1	23.520 8±10.206 6
OT-CT-SP	29.397 0±1.882 7	33.351 0±11.375 2
PF-CM+SP	32.360 6±2.456 8	11.545 3±2.342 9
SR-CME	73.594 2±12.890 2	40.674 8±4.297 8
BH-SP+PC	30.295 4±4.766 8	19.690 1±3.679 5
CM+SP	39.535 6±9.430 4	22.183 0±8.425 8
CM	37.892 6±11.412 8	36.770 8±6.417 6
SSB-SP-GF	28.251 4±4.591 7	22.342 0±4.720 7
SP+LN	55.543 6±25.962 6	55.442 0±19.268 4
SP+AW	25.436 6±3.253 6	18.176 8±3.085 5
SP+KL	17.559 8±3.298 1	39.399 6±19.912 4
SP+CA	39.045 4±5.903 5	35.518 8±3.786 7
SP+OT	25.862 3±3.467 2	15.490 2±4.570 8
SP+SG	31.189 5±3.135 5	26.250 5±17.893 2
SP+SSB	29.516 2±2.579 4	17.550 3±3.467 8
SP+W	27.239 7±5.316 5	31.560 4±16.704 5
SP-KH-CT	30.247 9±3.086 1	48.198 1±11.467 2
SP	28.383 4±6.642 7	39.905 5±14.560 7
平均值 Average	34.170 6±6.290 8	29.584 4±9.209 9

¹⁾ AV: 藏东蒿 *Artemisia vexans* Pamp.; OT: 固沙草 *Orinus thoroldii* (Stapf ex Hemsl.) Bor; AS: 劲直黄耆 *Astragalus strictus* Graham ex Benth; CT: 藏藁草 *Carex tibetica* Franch.; SP: 紫花针茅 *Stipa purpurea* Griseb.; PF: 金露梅 *Potentilla fruticosa* Linn.; CM: 青藏藁草 *Carex moorcroftii* Falc. ex Boott; SR: 昆仑针茅 *Stipa roborowskyi* Roshev.; CME: 窄叶藁草 *Carex montis-everestii* Kükenth.; BH: 拉萨小檗 *Berberis hemsleyana* Ahrendt; PC: 白草 *Pennisetum centrasiaticum* Tzvel.; SSB: 羽柱针茅 *Stipa subsessiliflora* var. *basiplumosa* (Munro ex Hook. f.) P. C. Kuo et Y. H. Sun; GF: 禾草 Gramineae forage grasses; LN: 矮火绒草 *Leontopodium nanum* (Hook. f. et Thoms. ex C. B. Clarke) Hand.-Mazz.; AW: 藏沙蒿 *Artemisia wellbyi* Hemsl. et Pears.; KL: 藏北蒿 *Kobresia littledalei* C. B. Clarke; CA: 干生藁草 *Carex aridula* V. Krecz.; SG: 沙生针茅 *Stipa glareosa* P. Smim.; W: 杂类草 Weeds; KH: 矮生高草 *Kobresia humilis* (C. A. Mey. ex Trautv.) Sergiev.

茅+沙生针茅、拉萨小檗-紫花针茅+白草、紫花针茅-矮生高草-藏藁草以及紫花针茅+羽柱针茅草地型,再到固沙草-藏藁草-紫花针茅、紫花针茅、羽柱针茅-紫花针茅-禾草、紫花针茅+杂类草、紫花针茅+固沙草、紫花针茅+藏沙蒿草以及紫花针茅+藏北蒿草地型,植物叶片 C/N 值逐渐下降,最大者(昆仑针茅-窄叶藁草草地型)几乎是最小者(紫花针茅+藏北蒿草地型)的 4 倍以上。

由表 1 还可以看出:19 个草地型植被根系的 C/N 平均值为 29.58, 变异系数达到 40.02%。从紫花针茅+矮火绒草、紫花针茅-矮生高草-藏藁草、昆仑针

茅-窄叶藁草、紫花针茅、紫花针茅+藏北蒿、青藏藁草草地型,到紫花针茅+干生藁草、固沙草-藏藁草-紫花针茅、紫花针茅+杂类草、紫花针茅+沙生针茅、藏东蒿、固沙草+劲直黄耆、羽柱针茅-紫花针茅-禾草草地型,再到青藏藁草+紫花针茅、拉萨小檗-紫花针茅+白草、紫花针茅+藏沙蒿、紫花针茅+羽柱针茅、紫花针茅+固沙草和金露梅-青藏藁草+紫花针茅草地型,根系的 C/N 值逐渐下降,最大者(紫花针茅+矮火绒草草地型)也几乎是最小者(金露梅-青藏藁草+紫花针茅草地型)的 4 倍以上。结果表明:西藏高原高寒草原植被无论是植物地上部分 C/N 值还是植物根系 C/N 值,不同草地型之间均有不同程度的差异;此外,植物地上部分 C/N 值均大于根系的 C/N 值,但其变异幅度小于后者。

2.1.3 不同自然地带植被 C/N 值的分布特征 西藏高原高寒草原不同自然地带植被地上部分和根系的 C/N 值见表 2。由表 2 可见:在西藏高原不同自然地带中植被 C/N 值的水平分布也存在差异。不同自然地带植物地上部分的 C/N 平均值为 31.98, 变异系数仅为 13.82%; 4 种自然地带按植物地上部分 C/N 值由大至小依次排序为山地灌丛草原带、高山灌丛草甸带、高山草原带、山地半荒漠与荒漠带;其中,山地灌丛草原带植物地上部分 C/N 值最大,为 34.65;而山地半荒漠与荒漠带植物地上部分 C/N 值最小,为 25.37, 仅相当于前者的 73.23%。由表 2 还可见:不同自然地带植物根系的 C/N 平均值为 31.86, 变异系数为 16.92%; 4 种自然地带按植物根系 C/N 值由大至小依次排序为高山草原带、山地半荒漠与荒漠带、山地灌丛草原带、高山灌丛草甸带;其中,高山草原带植物根系 C/N 值最大,为 39.42;而高山灌丛草甸带植物根系 C/N 值最小,为 27.83, 仅相当于前者的 70.61%。结果表明:无论是植物地上部分还是根系的 C/N 值,不同自然地带间均存在显著差异;此外,不同自然地带植物地上部分 C/N 值均大于根系 C/N 值,但其变异幅度却小于后者。

2.2 植被 C/N 值与环境因子的关系

2.2.1 植被 C/N 值与地理因子的关系 西藏高原高寒草原植被地上部分 C/N 值与地理因子的回归方程为 $Y=73.302 0-1.047 8X_1+0.138 1X_2-0.004 5X_3$ ($N=54, R=0.184 5, R_1=-0.114 7, R_2=0.049 7, R_3=-0.095 2$); 植物根系 C/N 值与地理因子的回归方程为 $Y=-66.408 4+1.302 9X_1-0.269 0X_2+0.017 7X_3$

表2 西藏高原高寒草原不同自然地带植被地上部分和根系的 C/N 值比较 ($\bar{X} \pm SE$)Table 2 Comparison of C/N value in above-ground part and root of vegetation among different natural transects of alpine steppe in Tibetan Plateau ($\bar{X} \pm SE$)

自然地带 Natural transect	地上部分 C/N 值 C/N value in above-ground part	根系 C/N 值 C/N value in root
高山草原 Alpine grassland	33.927 8±12.658 5	39.420 9±15.996 2
高山灌丛草甸 Alpine shrub and meadow	33.995 1±9.918 0	27.836 2±14.719 4
山地半荒漠与荒漠 Mountain semidesert and desert	25.370 4±7.247 9	32.044 0±15.953 5
山地灌丛草原 Mountain shrub steppe	34.645 0±10.780 8	28.149 0±11.653 5
平均值 Average	31.984 5±10.151 3	31.862 5±14.580 7

($N=54, R=0.3217, R_1=0.1091, R_2=-0.0739, R_3=0.2771$)。从回归方程可以看出:西藏高原高寒草原植被植物地上部分 C/N 值与纬度(X_1)和海拔(X_3)呈负相关关系、与经度(X_2)呈正相关关系;植物根系 C/N 值与纬度(X_1)和海拔(X_3)呈正相关关系、与经度(X_2)呈负相关关系。根据标准误差检验,这2个回归方程均未通过0.05水平的显著性检验,但植物根系 C/N 值与海拔(X_3)的偏相关系数($R_3=0.2771$)达到显著水平($P<0.05$)。表明对西藏高原高寒草原植被植物地上部分 C/N 值影响最大的地理因子是纬度,而对植物根系 C/N 值影响最大的因子是海拔。此外,地理因子对西藏高原高寒草原生态系统植被 C/N 值的影响整体不显著。

2.2.2 植被 C/N 值与气候因子的关系 西藏高原高寒草原植被地上部分 C/N 值与气候因子的回归方程为 $Y=16.1396+0.0055X_7+0.4161X_9-0.0105X_{10}$ ($N=54, R=0.3541, R_7=0.1793, R_9=0.2392, R_{10}=-0.2607$)。从回归方程可看出:影响西藏高原高寒草原植被植物地上部分 C/N 值的主要气候因子是 ≥ 10 °C 积温(X_7)、6月至9月降水率(X_9)和年均蒸发量(X_{10}),而年均日照时数(X_1)、年均气温(X_2)、最冷月均气温(X_3)、最暖月均气温(X_4)、 ≥ 0 °C 积温(X_5)、 ≥ 5 °C 积温(X_6)、年均降水量(X_8)、年均相对湿度(X_{11})的影响则很小。此外,植物地上部分 C/N 值与 ≥ 10 °C 积温和6月至9月降水率呈正相关关系、与年均蒸发量呈负相关关系。根据标准误差检验,植物地上部分 C/N 值与气候因子的相关方程未通过0.05水平的显著性检验。表明西藏高原高寒草原植被地上部分 C/N 值随 ≥ 10 °C 积温和6月至9月降水率的增加以及年均蒸发量的减少而增大,也表明气候因子对植物地上部分 C/N 值的影响未达到显著水平。

西藏高原高寒草原植被根系 C/N 值与气候因子

的回归方程为 $Y=76.1611+7.4254X_4+0.0163X_5-0.0201X_7-0.1717X_8+0.76948X_9-0.0722X_{10}$ ($N=54, R=0.4709, R_4=0.2487, R_5=0.2804, R_7=-0.2190, R_8=-0.3770, R_9=0.2329, R_{10}=-0.2951$)。从回归方程可看出:影响西藏高原高寒草原植被植物根系 C/N 值的主要气候因子是最暖月均气温(X_4)、 ≥ 0 °C 积温(X_5)、 ≥ 10 °C 积温(X_7)、年均降水量(X_8)、6月至9月降水率(X_9)和年均蒸发量(X_{10}),而年均日照时数(X_1)、年均气温(X_2)、最冷月均气温(X_3)、 ≥ 5 °C 积温(X_6)和年均相对湿度(X_{11})的影响则很小。植物根系 C/N 值与年均降水量和年均蒸发量的偏相关系数($R_8=-0.3770, R_{10}=-0.2951$)达到极显著($P<0.01$)或显著($P<0.05$)水平,而与最暖月均气温、 ≥ 0 °C 积温、 ≥ 10 °C 积温和6月至9月降水率的偏相关系数未达到显著水平。根据标准误差检验,植物根系 C/N 值与气候因子的回归方程未通过0.01水平的显著性检验。表明影响西藏高原高寒草原植被植物根系 C/N 值的主要气候因子是最暖月均气温、 ≥ 0 °C 积温、 ≥ 10 °C 积温、年均降水量、6月至9月降水率和年均蒸发量;其中,年均降水量和年均蒸发量的影响尤为显著,植物根系 C/N 值随年均降水量和年均蒸发量的减少而显著增大。此外,气候因子对植物根系 C/N 值的影响未达到极显著水平,而且影响植物地上部分与根系 C/N 值的气候因子各不相同。

2.2.3 植被 C/N 值与植被因子的关系 西藏高原高寒草原植被植物地上部分 C/N 值与植被因子的回归方程为 $Y=33.2993+0.0340X_5-0.2321X_7$ ($N=54, R=0.6505, R_5=0.3124, R_7=-0.3252$)。从方程可以看出:影响西藏高原高寒草原植被植物地上部分 C/N 值的主要植被因子是地上部生物量(X_5)和植被高度(X_7),而0~10 cm 地下部生物量(X_1)、10~20 cm 地下部生物量(X_2)、20~30 cm 地下部生物量

(X_3)、30~40 cm 地下部生物量(X_4)和植被盖度(X_6)等植被因子则对地上部分 C/N 值无明显影响。此外,植物地上部分 C/N 值与地上部生物量和植被高度的偏相关系数($R_5=0.3124$, $R_7=-0.3252$)均达到显著水平($P<0.05$)。根据标准误差检验,青藏高原高寒草原植被植物地上部分 C/N 值与植被因子的回归方程通过了 0.01 水平的显著性检验。表明影响青藏高原高寒草原植被植物地上部分 C/N 值的主要植被因子是地上部生物量和植被高度,地上部分 C/N 值随地上部生物量的增加和植被高度的降低而显著增大;此外,植被因子对植物地上部分 C/N 值的影响达到极显著水平。

青藏高原高寒草原植被根系 C/N 值与植被因子的回归方程为 $Y=33.7620-0.0031X_1+0.0297X_6$ ($N=54$, $R=0.3398$, $R_1=-0.2778$, $R_6=0.1991$)。从方程中可看出:影响青藏高原高寒草原植被植物根系 C/N 值的主要植被因子是 0~10 cm 地下部生物量(X_1)和植被盖度(X_6),而 10~20 cm 地下部生物量(X_2)、20~30 cm 地下部生物量(X_3)、30~40 cm 地下部生物量(X_4)、地上部生物量(X_5)和植被高度(X_7)等植被因子则对植物根系 C/N 值无明显影响。此外,植物根系 C/N 值与 0~10 cm 地下部生物量的偏相关系数($R_1=-0.2778$)达到显著水平($P<0.05$)。根据标准误差检验,青藏高原高寒草原植被植物根系 C/N 值与植被因子的回归方程通过了 0.01 水平的显著性检验。表明影响青藏高原高寒草原植被植物根系 C/N 值的主要植被因子是 0~10 cm 地下部生物量和植被盖度,植物根系 C/N 值随 0~10 cm 地下部生物量的减少而显著增大;此外,植被因子对植物根系 C/N 值的影响达到极显著水平,但影响植物地上部分与根系 C/N 值的植被因子各不相同。

2.2.4 植被 C/N 值与土壤物理因子的关系 青藏高原高寒草原植被地上部分 C/N 值与土壤物理因子的回归方程为 $Y=45.9190+28.7800X_1-16.6617X_2-21.9647X_3+0.8399X_5-0.8774X_6-0.0755X_8$ ($N=54$, $R=0.2907$, $R_1=0.1128$, $R_2=-0.0600$, $R_3=-0.2394$, $R_5=0.2086$, $R_6=-0.2000$, $R_8=-0.0350$)。从方程中可看出:影响青藏高原高寒草原植被植物地上部分 C/N 值的主要土壤物理因子是 0~10 cm 土壤容重(X_1)、10~20 cm 土壤容重(X_2)、20~30 cm 土壤容重(X_3)、0~10 cm 土壤含水量(X_5)、10~20 cm 土壤含水量(X_6)和 30~40 cm 土壤含水量(X_8),而

30~40 cm 土壤容重(X_4)和 20~30 cm 土壤含水量(X_7)则对植物地上部分 C/N 值无明显影响。根据标准误差检验,植物地上部分 C/N 与土壤物理因子的回归方程未通过 0.05 水平的显著性检验。表明影响青藏高原高寒草原植被植物地上部分 C/N 值的主要土壤物理因子是 0~10 cm 土壤容重、10~20 cm 土壤容重、20~30 cm 土壤容重、0~10 cm 土壤含水量、10~20 cm 土壤含水量和 30~40 cm 土壤含水量,随 0~10 cm 土壤容重和 0~10 cm 土壤含水量的增加以及 10~20 cm 土壤容重、20~30 cm 土壤容重、10~20 cm 土壤含水量和 30~40 cm 土壤含水量的降低,植物地上部分 C/N 值增大;此外,土壤物理因子对植物地上部分 C/N 值的影响未达到显著水平。

青藏高原高寒草原植被根系 C/N 值与土壤物理因子的回归方程为 $Y=-3.8560+28.5070X_3$ ($N=54$, $R=0.3206$)。从方程中可看出:影响青藏高原高寒草原植被植物根系 C/N 值的主要土壤物理因子是 20~30 cm 土壤容重(X_3),而 0~10 cm 土壤容重(X_1)、10~20 cm 土壤容重(X_2)、30~40 cm 土壤容重(X_4)、0~10 cm 土壤含水量(X_5)、10~20 cm 土壤含水量(X_6)、20~30 cm 土壤含水量(X_7)和 30~40 cm 土壤含水量(X_8)等土壤物理因子则对植物根系 C/N 值无明显影响。根据标准误差检验,植物根系 C/N 值与土壤物理因子的回归方程通过了 0.05 的显著性检验。表明影响青藏高原高寒草原植被植物根系 C/N 值的主要土壤物理因子是 20~30 cm 土壤容重,随 20~30 cm 土壤容重的增加植物根系 C/N 值显著增大;此外,土壤物理因子对植物根系 C/N 值的影响达到显著水平,但影响植物地上部分与植物根系 C/N 值的土壤物理因子各不相同。

2.2.5 植被 C/N 值与土壤化学因子的关系 青藏高原高寒草原植被地上部分 C/N 值与土壤化学因子的回归方程为 $Y=31.6770-0.0134X_2-76.0199X_5-10.7705X_7-2981583.0022X_8+5140260.7348X_9-1.5046X_{13}$ ($N=54$, $R=0.5671$, $R_2=-0.1707$, $R_5=-0.4243$, $R_7=-0.3454$, $R_8=-0.1694$, $R_9=0.1694$, $R_{13}=-0.1425$)。从方程中可看出:影响青藏高原高寒草原植被植物地上部分 C/N 值的主要土壤化学因子是土壤速效 N 含量(X_2)、全 N 含量(X_5)、全 K 含量(X_7)、有机质含量(X_8)、总有机 C 含量(X_9)和活性 C 含量(X_{13}),而土壤 pH 值(X_1)、速效 P 含量(X_3)、速效 K 含量(X_4)、全 P 含量(X_6)、总碳水化合物含量

(X_{10})、水解性 C 含量(X_{11})、水溶性 C 含量(X_{12})和 HCO_3^- 含量(X_{14})等土壤化学因子则对植物地上部分 C/N 值无明显影响。此外,植物地上部分 C/N 值与全 N 含量和全 K 含量的偏相关系数($R_5 = -0.4243$, $R_7 = -0.3454$)达到极显著($P < 0.01$)或显著($P < 0.05$)水平,而与土壤速效 N 含量、有机质含量、总有机 C 含量和活性 C 含量的偏相关系数未达到显著水平($P > 0.05$)。根据标准误差检验,西藏高原高寒草原植被植物地上部分 C/N 值与土壤化学因子的回归方程通过了 0.01 水平的显著性检验。表明影响西藏高原高寒草原植被植物地上部分 C/N 值的主要土壤化学因子是土壤速效 N、全 N、全 K、有机质、总有机 C 和活性 C 含量,其中土壤全 N 和全 K 含量的影响尤为显著,随土壤全 N 和全 K 含量的降低植物地上部分 C/N 值显著增大;此外,土壤化学因子对植物地上部分 C/N 值的影响达到极显著水平。

根系 C/N 值与土壤化学因子的回归方程为 $Y = 46.2999 - 0.0198X_2 - 0.0252X_4 - 4.559013.5976X_8 + 7.859749.9736X_9 - 458.4087X_{10} + 416.8062X_{11} - 3.9765X_{13} - 49.864.9497X_{14}$ ($N = 54, R = 0.6002, R_2 = -0.1791, R_4 = -0.1898, R_8 = -0.1893, R_9 = 0.1893, R_{10} = 0.2386, R_{11} = 0.2076, R_{13} = -0.2571, R_{14} = -0.1658$)。从方程中可看出:影响西藏高原高寒草原植被植物根系 C/N 值的主要土壤化学因子是土壤速效 N 含量(X_2)、速效 K 含量(X_4)、有机质含量(X_8)、总有机 C 含量(X_9)、总碳水化合物含量(X_{10})、水解性 C 含量(X_{11})、活性 C 含量(X_{13})和 HCO_3^- 含量(X_{14}),而土壤 pH 值(X_1)、速效 P 含量(X_3)、全 N 含量(X_5)、全 P 含量(X_6)、全 K 含量(X_7)和水溶性 C 含量(X_{12})等土壤化学因子则对植物根系 C/N 值无明显影响。根据标准误差检验,植物根系 C/N 值与土壤化学因子的回归方程通过了 0.01 水平的显著性检验。表明影响西藏高原高寒草原植被植物根系 C/N 值的主要土壤化学因子是土壤速效 N、速效 K、有机质、总有机 C、总碳水化合物、水解性 C、活性 C 和 HCO_3^- 含量,随总有机 C、总碳水化合物和水解性 C 含量的增加以及土壤速效 N、速效 K、有机质、活性 C 和 HCO_3^- 含量的降低,植物根系 C/N 值增大;此外,土壤化学因子对植物根系 C/N 值的影响达到极显著水平,但影响植物地上部分与根系 C/N 值的土壤化学因子各不相同。

3 讨论和结论

由于植物 C/N 值存在相当大的变异性,利用碳储量与固定的 C/N 值来计算氮储量会产生较大的不确定性,因此,应构建不同植被类型的 C/N 值数据库,加强不同类型生态系统中植物 C/N 值的空间变异性研究,深入探讨植物 C/N 值分布的空间格局和调控因素,才能更加准确地估算植物碳氮储量和模拟生态系统碳氮循环过程^[16]。从本研究结果看:西藏高原高寒草原植被 C/N 值在水平方向上呈现出东西部高中间低的态势和斑块状交错分布的格局;植被 C/N 高值区主要集中在以扎日南木错和洞措为核心的藏北高原腹地,而在马攸木拉山以西则为植被 C/N 低值区。无论是植物地上部分还是植物根系的 C/N 值,在不同草地型间和不同自然地带间均存在显著差异。西藏高原高寒草原生态系统植物地上部分的 C/N 平均值均高于内蒙古大针茅 (*Stipa grandis* P. Smirn.) 草原^[17]、中国东部南北样带森林^[18]、青海高寒草甸^[19]、川西北亚高山高寒草甸^[20]、内蒙古天然白杆 (*Picea meyeri* Rehd. et Wils.) 林^[21]、黄土高原草本植物^[22]、全球草本植物^[4]、北京及其周边草本植物^[4]、闽江河口湿地植物^[23]、秦岭亚高山草甸^[24]、亚热带常绿阔叶林以及温带针阔混交林和热带季雨林^[25];其植物根系的 C/N 平均值高于川西北亚高山高寒草甸^[20]、秦岭亚高山草甸^[24]、内蒙古天然白杆林和内蒙古天然白桦 (*Betula platyphylla* Suk.) 林^[21],但低于黄土高原典型草原植物^[22]、闽江河口湿地植物^[23]和内蒙古科尔沁沙地植物^[26]。由此可以看出:与其他区域相比,西藏高原高寒草原生态系统植被地上部分 C/N 值处于较高水平,但其植物根系 C/N 值处于中等水平。造成这一现象可能有 2 个原因:1) 西藏高原地势高亢、气候较为寒冷,较低的气温抑制了有机物分解和矿化,降低了土壤 N 素的有效性,抑制了土壤养分的移动和根的吸收;2) 西藏高原是世界上 youngest 的高原,土壤发育较晚且质地较为粗糙,土壤 N 的淋溶作用较为强烈。

研究结果显示:西藏高原高寒草原植被地上部分 C/N 值与地上部生物量以及土壤全 N 和全 K 含量呈显著正相关、与植被高度呈显著负相关;其植物根系 C/N 值与海拔和 20~30 cm 土壤容重呈显著正相关、与年均降水量和年均蒸发量呈显著负相关。植物地

上部分 C/N 值与纬度和海拔呈负相关、与经度呈正相关;而植物根系 C/N 值却与纬度和海拔呈正相关、与经度呈负相关。丁小慧等^[26]认为:呼伦贝尔草地植物群落叶片 C/N 值随经度梯度升高而显著增加;王绍强等^[16]认为:随着向赤道接近,森林叶 C/N 值会增加;刘超等^[27]认为:黄土高原植物地上部分 C/N 值与年均降水量和年均温度不相关;作者针对青藏高原高寒草原植被植物地上部分 C/N 值与环境因子相关性的研究结果也得出了一致的结论。但韩文轩等^[4]的结果表明:北京及周边地区植物地上部分 C/N 值与海拔呈正相关、与气候因子(年均温度和降水量)呈负相关,这一研究结果与作者的结论有异。其原因尚不清楚,有待进一步研究。

参考文献:

- [1] MARSCHNER H. Mineral Nutrition of Higher Plants [M]. New York: Academic Press, 1995.
- [2] NIKLAS K J, OWENS T, REICH P B, et al. Nitrogen/phosphorus leaf stoichiometry and the scaling of plant growth [J]. Ecology Letters, 2005, 8(6): 636-642.
- [3] REICH P B, TJOELKER M G, MACHADO J L, et al. Universal scaling of respiratory metabolism, size and nitrogen in plants [J]. Nature, 2006, 439: 457-461.
- [4] 韩文轩, 吴 漪, 汤璐琰, 等. 北京及周边地区植物叶的碳氮磷元素计量特征[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2009, 45(5): 855-860.
- [5] STERNER R W, ELSER J J. Ecological Stoichiometry: the Biology of Elements from Molecules to the Biosphere [M]. Princeton: Princeton University Press, 2002.
- [6] AGREN G I. The C:N:P stoichiometry of autotrophs-theory and observations[J]. Ecology Letters, 2004, 7(3): 185-191.
- [7] VITOUSEK P. Nutrient cycling and nutrient use efficiency [J]. American Naturalist, 1982, 119(4): 553-572.
- [8] ZHANG L X, BAI Y F, HAN X G. Application of N:P stoichiometry to ecology studies [J]. 植物学报, 2003, 45(9): 1009-1018.
- [9] 王建林, 欧阳华, 王忠红, 等. 青藏高原高寒草原土壤活性有机碳的分布特征[J]. 地理学报, 2009, 64(7): 771-781.
- [10] 张尧洲, 石培礼, 刘允芬, 等. 青藏高原高寒草原生态系统土壤 CO₂ 排放及其碳平衡[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34(增刊 II): 193-199.
- [11] WANG L, OUYANG H, ZHOU C P, et al. Soil organic matter dynamics along a vertical vegetation gradient in the Gongga Mountain on the Tibetan Plateau [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2005, 47(4): 411-420.
- [12] 张金霞, 曹广民. 高寒草甸生态系统氮素循环[J]. 生态学报, 1999, 19(4): 509-512.
- [13] 西藏自治区土地管理局编. 西藏草地资源[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [14] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- [15] 唐明义, 冯明光. 实用统计分析及其 DPS 数据处理系统[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 286-297.
- [16] 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.
- [17] 银晓瑞, 梁存柱, 王立新, 等. 内蒙古典型草原不同恢复演替阶段植物养分化学计量学[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 39-47.
- [18] 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.
- [19] 王文颖, 王启基, 王 刚, 等. 高寒草甸土地退化及其恢复重建对植被碳、氮含量的影响[J]. 植物生态学报, 2007, 31(6): 1073-1078.
- [20] 石福孙, 陈华峰, 吴 宁. 增温对川西北亚高山高寒草甸植物群落碳、氮含量的影响[J]. 植物研究, 2008, 28(6): 730-736.
- [21] 印婧婧, 郭大立, 何思源, 等. 内蒙古半干旱区树木非结构性碳、氮、磷的分配格局[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2009, 45(3): 519-527.
- [22] 董晓玉, 傅 华, 李旭东, 等. 放牧与围封对黄土高原典型草原植物生物量及其碳氮磷贮量的影响[J]. 草业学报, 2008, 19(2): 175-182.
- [23] 章文龙, 曾从盛, 张林海, 等. 闽江河口湿地植物氮磷吸收效率的季节变化[J]. 应用生态学报, 2009, 20(6): 1317-1322.
- [24] 何亚婷, 刘文治, 党高弟, 等. 秦岭亚高山草甸 30 种草本植物的碳、氮分布研究[J]. 草业科学, 2008, 25(10): 1-5.
- [25] 王晶苑, 王绍强, 李纫兰, 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]. 植物生态报, 2011, 35(6): 587-595.
- [26] 丁小慧, 罗淑政, 刘金巍, 等. 呼伦贝尔草地植物群落与土壤化学计量学特征沿经度梯度变化[J]. 生态学报, 2012, 32(11): 3467-3476.
- [27] 刘 超, 王 洋, 王 楠, 等. 陆地生态系统植被氮磷化学计量研究进展[J]. 植物生态学报, 2012, 36(11): 1205-1216.

(责任编辑: 惠 红)