

青藏高原高寒草原生态系统植被碳密度分布规律及其与气候因子的关系

王建林¹, 欧阳华², 王忠红¹, 常天军¹, 沈振西², 钟志明²

(1. 西藏农牧学院植物科学技术系, 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: 根据青藏高原高寒草原生态系统中以降水量为主要驱动力的东西样带和以气温为主要驱动力的南北样带内植被土壤的实测数据, 分析了这一区域植被碳密度的分布特征及其与气候因子之间的关系。结果表明, 在南北样带内(北纬 28°46' ~ 31°40'), 植被碳密度首先随纬度的增加而增加, 当纬度达到约北纬 30°16' 处, 植被碳密度达到最大值 0.873 1 kg · m⁻², 之后, 则随纬度的增加而减少, 植被碳密度总体上呈现出南北低、中间高的分布特征; 在东西样带内(东经 80°02' ~ 91°50'), 植被碳密度随经度的增加而增加, 呈现出东高西低的分布特征。在南北样带内植被碳密度与年均降水量和年均气温之间的偏相关系数均达到极显著水平, 而在东西样带内植被碳密度与年均降水量和年均气温之间的偏相关系数也均达到显著水平; 在南北样带内植被碳密度先随年均气温和年均降水量的增加而增加, 当年均气温达到约 -1.5 °C、年均降水量达到约 497.0 mm 时, 植被碳密度达到最大值 1.329 6 kg · m⁻², 之后, 随年均气温和年均降水量的增加而减少; 在东西样带内植被碳密度也先随年均气温和年均降水量的增加而增加, 当年均气温达到约 0.7 °C、年均降水量达到约 409.0 mm 时, 植被碳密度达到最大值 1.208 3 kg · m⁻², 之后, 随年均气温和年均降水量的增加而减少。研究结果显示, 青藏高原高寒草原生态系统南北样带和东西样带内的植被碳密度分布均是年均气温和年均降水量综合作用的结果, 且年均降水量的作用大于年均气温。

关键词: 青藏高原; 高寒草原; 植被碳密度; 回归分析; 气候因子; 地理位置

中图分类号: Q948.112 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-7895(2010)01-0001-07

Distribution rule of vegetation carbon density and its relationship with climatic factor in alpine grassland ecosystem of Qinghai-Tibetan Plateau WANG Jian-lin¹, OUYANG Hua², WANG Zhong-hong¹, CHANG Tian-jun¹, SHEN Zhen-xi², ZHONG Zhi-ming² (1. Plant Sci-Tech Department of Tibet Agricultural and Animal Husbandry College, Linzhi 860000, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2010, 19(1): 1-7

Abstract: Based on the measured data of vegetation and soil from the East-West sample belt (EW sample belt) and the North-South sample belt (NS sample belt) which are mainly driven by precipitation and temperature respectively in alpine grassland ecosystem of Qinghai-Tibetan Plateau, the vegetation carbon density distribution characteristics and its relationship with climatic factor were analyzed. The results show that in NS sample belt (N 28°46' - 31°40'), the vegetation carbon density increases first with latitude increasing with the highest value of 0.873 1 kg · m⁻² at about N 30°16', and then decreases with latitude increasing. The distribution characteristics of vegetation carbon density are lower in southern and northern transects and higher in middle transect. In EW sample belt (E 80°02' - 91°50'), the vegetation carbon density increases with longitude increasing, and the distribution characteristics of vegetation carbon density are higher in eastern transect and lower in western transect. In NS sample belt, the partial correlation coefficient between vegetation carbon density and average annual precipitation, average annual temperature is all highly significant, and the same in EW sample belt is also significant. In NS sample belt, vegetation carbon density increases first with increasing of average annual temperature and average

收稿日期: 2009-03-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40661007)

作者简介: 王建林(1969-), 男, 甘肃临洮人, 学士, 教授, 主要从事高原生态环境与生物多样性研究。

annual precipitation with the highest value of $1.3296 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ when average annual temperature about $-1.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ and average annual precipitation about 497.0 mm , and then decreases with increasing of average annual temperature and average annual precipitation. In EW sample belt, vegetation carbon density increases first with increasing of average annual temperature and average annual precipitation with the highest value of $1.2083 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ when average annual temperature about $0.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ and average annual precipitation about 409.0 mm , and then decreases with increasing of average annual temperature and average annual precipitation. It is suggested that the distribution of vegetation carbon density in NS and EW sample belts of alpine grassland ecosystem of Qinghai-Tibetan Plateau is the combinative result of average annual temperature and average annual precipitation, but the influence of the later is higher than that of the former.

Key words: Qinghai-Tibetan Plateau; alpine grassland; vegetation carbon density; regression analysis; climatic factor; geographical position

草地是自然界中一种广泛分布的陆地生态系统类型。由于具有种类繁多、分布广泛、生命力强、萌生力强、生产力高及适生范围宽等特点,草地不仅在群落的演替过程中扮演着极其重要的角色,而且在区域环境保护和替代能源等方面也起着非常重要的作用。近年来,为正确评价中国陆地生态系统在全球及区域碳循环和碳平衡中的作用,中国科学家对中国森林、灌丛及草地等植被的碳贮量进行了广泛的估算^[1-7],但是对青藏高原草地生态系统碳贮量及其空间分布格局的研究还较为薄弱^[8]。

在国际生物圈(IBP)研究计划中,青藏高原被列为全球气候变化的敏感区域之一,这种极端环境下发育的植被和土壤对气候变化极为敏感,是研究生态系统对气候变化响应与适应机制的天然实验室。高寒草原是青藏高原广泛分布的一种植被类型,它不仅是亚洲中部高寒环境中典型的生态系统之一,而且在世界高寒地区也极具代表性。近年来,虽然对高寒草原生态系统的碳循环问题进行了一些研究^[8-11],但基础资料仍然十分缺乏,尤其缺少基于实地观测数据的分析研究,有关青藏高原高寒草原生态系统植被碳密度梯度分布及其与气候因子关系方面的研究也尚未见报道。

为了定量分析青藏高原高寒草原生态系统植被碳密度在空间上的梯度变化,作者基于以降水量为主要驱动力的东西样带和以气温为主要驱动力的南北样带,并根据各样带的实测数据,分析了青藏高原高寒草原生态系统植被碳密度的空间分布特点及其与气候因素(降水量和气温)之间的关系,为研究青藏高原高寒草原生态系统对气候变化的响应提供基础资料,也为理解青藏高原对气候变化响应的区域差异

提供科学依据。

1 研究方法

1.1 样带及样点设置

为了定量分析青藏高原高寒草原生态系统植被碳密度的水平地带性分布特征,设置了经度和纬度2个方向的渐变样带。沿纬度方向设置5个样点,从南向北依次是曲松、墨竹工卡、当雄、那曲和安多(下称南北样带),该样带跨纬度 $2^{\circ}54'$ (北纬 $28^{\circ}46' \sim 31^{\circ}40'$)、跨经度 $1^{\circ}18'$ (东经 $91^{\circ}04' \sim 92^{\circ}22'$),海拔落差 40 m ($4591 \sim 4631 \text{ m}$)。沿经度方向从东向西也设置了5个样点,依次是安多、班戈、改则、革吉、噶尔(下称东西样带),该样带跨经度 $11^{\circ}48'$ (东经 $80^{\circ}02' \sim 91^{\circ}50'$)、跨纬度 $1^{\circ}10'$ (北纬 $31^{\circ}24' \sim 32^{\circ}34'$),海拔落差 237 m ($4374 \sim 4611 \text{ m}$)。各样点基本情况见表1。

1.2 样品采集及测定

于2007年7月至8月沿上述东西样带和南北样带进行野外考察,并用全球定位系统(GPS)确定每个样点的地理坐标。在每个样点分别设置面积 $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ 的采样地12块,各采样地水平间隔 100 m 。采用对角线方式在每个采样地内间隔选取6块样地,每块样地内随机设置3个面积 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的小样方。采用收获法^[12]收获植物体的地上部分后,挖取 $25 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$ 的土柱,土柱深度为 40 cm ,并按 $0 \sim 10$ 、 $10 \sim 20$ 、 $20 \sim 30$ 和 $30 \sim 40 \text{ cm}$ 分层取土样,取出的土样连同根系用纱布包好,供室内分析。现场调查每个小样方中的植物物种数、优势种、平均高度和平均盖度,并记录坡度、海拔、坡向和土壤类型等基础资料。

表 1 青藏高原高寒草原样点基本情况

Table 1 The basic status of sample plots in alpine grassland of Qinghai-Tibetan Plateau

地点 Location	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔/m Altitude	年均降水量/mm Average annual precipitation	年均气温/℃ Average annual temperature	自然地带 Natural transect
安多 Amdo	E 91°50'	N 31°40'	4 611	409.0	-3.0	高山灌丛草甸带 Alpine-shrub-meadow transect
那曲 Nakqu	E 91°22'	N 31°31'	4 633	400.1	-1.9	高山灌丛草甸带 Alpine-shrub-meadow transect
当雄 Damxung	E 91°04'	N 30°31'	4 576	483.1	1.3	高山灌丛草甸带 Alpine-shrub-meadow transect
墨竹工卡 Maizhokunggar	E 92°22'	N 29°47'	4 947	497.0	2.6	山地灌丛草原带 Mountain-shrub-grassland transect
曲松 Qusum	E 92°07'	N 28°46'	4 591	402.4	2.0	山地灌丛草原带 Mountain-shrub-grassland transect
班戈 Baingoin	E 90°03'	N 31°24'	4 907	301.2	-1.2	高山草原带 Alpine-grassland transect
改则 Gêrzê	E 84°48'	N 32°05'	4 447	166.1	0.1	高山草原带 Alpine-grassland transect
革吉 Gê'gyai	E 82°27'	N 32°16'	4 374	120.4	0.5	高山草原带 Alpine-grassland transect
噶尔 Gar	E 80°02'	N 32°34'	4 468	54.3	0.7	山地半荒漠与荒漠带 Mountain semi-desert and desert transect

将植物体地上部分置于 80 °C 的恒温烘箱中烘至恒质量;地下部分分层根系分别用水冲洗干净并风干,置于 80 °C 的恒温烘箱中烘至恒质量。分别称取植物体地上部分及地下部分分层根系的干质量,并用重铬酸钾氧化-外加加热法测定样品的碳含量。植被碳密度计算公式为^[1]:

$$DVC_i = \sum_{i=1}^k DVC_i = \sum_{i=1}^k C_i O_i$$

式中, DVC_i 为单位面积植被碳密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$); k 为植被生物量所分层次(地上部分和地下部分); C_i 为植被碳含量(%); O_i 为单位面积内的植被生物量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)。

1.3 气象资料的收集与数据分析

野外考察完成后,收集样带内各样点相邻气象站的年均气温和年均降水量等气象资料^[13-26],并借助 DPS 统计软件^[27]分析植被碳密度与年均降水量和年均气温等气候因子之间的关系。

2 结果和分析

2.1 南北样带内植被碳密度的梯度分布及其与气候因子的关系

2.1.1 植被碳密度的梯度分布特征 研究结果表明,青藏高原高寒草原生态系统的南北样带表层(0 ~

20 cm) 植被碳密度为 $(0.569 0 \pm 0.274 9) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 变异系数为 48.31%。在不同的高寒草原生态系统中,南北样带内植被碳密度不同。

样带南部区域属喜马拉雅山北翼山原湖盆区,地理位置为北纬 28°46' ~ 29°47', 位于喜马拉雅山和藏南分水岭之间,海拔一般为 4 300 ~ 4 600 m, 湖盆区外围山地和丘陵相对高差一般约为 500 m, 年均气温为 0.7 °C ~ 2.6 °C; 该区域地处喜马拉雅山脉北麓雨影区, 受溯江而上的印度洋暖湿气流影响较小, 年均降水量为 200 ~ 400 mm。在寒冷干旱气候条件下, 该区域广泛发育着以固沙草 [*Orinus thoroldii* (Stapf ex Hemsl.) Bor] 和劲直黄耆 (*Astragalus strictus* R. Grah. ex Benth.) 为优势种的固沙草+劲直黄耆草地型植被群落, 伴生种类有紫花针茅 (*Stipa purpurea* Griseb.)、昆仑针茅 (*Stipa roborowskyi* Roshev.)、二裂委陵菜 (*Potentilla bifurca* L.)、窄叶薹草 (*Carex montis-everestii* Kükenth.)、藏白蒿 (*Artemisia younghusbandii* J. R. Drum. ex Pamp.)、藏沙蒿 (*Artemisia wellbyi* Hemsl. et Pears. ex Deasy) 和白花枝子花 (*Dracocephalum heterophyllum* Benth.)。在这一区域内, 植被碳密度为 $(0.437 7 \pm 0.285 0) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 纬度每向北递增 1°, 植被碳密度增加 $(0.467 7 \pm 0.033 0) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

样带中部区域属藏中山原湖盆区, 地理位置为北

纬 29°47' ~ 30°31', 该区域位于藏南分水岭和念青唐古拉山之间, 海拔一般为 4 200 ~ 4 900 m, 湖盆区外围山地和丘陵相对高差一般约为 500 m, 年均气温为 1.3 °C ~ 2.6 °C, 年均降水量为 483 ~ 497 mm。在此区域广泛发育着以金露梅 (*Potentilla fruticosa* L.)、青藏薹草 (*Carex moorcroftii* Falc. ex Boott) 和紫花针茅为优势种的金露梅-青藏薹草+紫花针茅草地型植被群落, 伴生种类有川西锦鸡儿 (*Caragana erinacea* Kom.)、香柏 [*Sabina pingii* var. *wilsonii* (Rehd.) Cheng et L. K. Fu]、羊茅 (*Festuca ovina* L.)、粗壮嵩草 (*Kobresia robusta* Maxim.)、钉柱委陵菜 (*Potentilla saundersiana* Royle)、毛穗香薷 (*Elsholtzia eriostachya* Benth.) 和西藏铁线莲 (*Clematis tenuifolia* Royle)。在这一区域内, 植被碳密度为 (0.813 8 ± 0.158 1) kg · m⁻², 纬度每向北递增 1°, 植被碳密度增加 (0.357 8 ± 0.033 0) kg · m⁻²。

样带北部区域属藏北山原宽谷区, 地理位置为北纬 30°31' ~ 31°40', 该区域位于念青唐古拉山和唐古拉山之间, 高原面保持较为完整, 为典型的宽谷、丘陵地貌, 谷地平均海拔约 4 500 m, 相对高差为 200 ~ 400 m。该区域内气候受西南季风和高空西风环流共同控制, 西南季风夹带的暖湿气流因受巨大山系阻隔, 仅有少部分溯河而上楔入高原, 对该区域影响较弱, 但西北来的冷空气却可以畅通穿越全境, 念青唐古拉山和唐古拉山对冷空气的阻滞作用在那曲一带形成一个很强的冷舌, 自西北向东南伸展, 年均气温为 -3.0 °C ~ 1.3 °C, 全年降水量的 84.6% ~ 87.9% 集中在 6 月份至 9 月份, 且多为固态降水, 降雪量占年均降水量的 30% 以上。在这种高寒半湿润气候条件下, 该区域广泛发育着以青藏薹草和紫花针茅为优势种的青藏薹草+紫花针茅草地型植被群落, 伴生种类有丝颖针茅 (*Stipa capillacea* Keng)、羊茅、毛香火绒草 [*Leotopodium stracheyi* (Hook. f.) C. B. Clarke]、二裂委陵菜和纤秆蒿 (*Artemisia demissa* Krasch.) 等; 或发育着以紫花针茅为单一优势种的紫花针茅+杂草草地型植被群落, 伴生种类有早熟禾 (*Poa annua* L.)、狼毒 (*Stellera chamaejasme* L.)、藏北高原芥 (*Christolea baiogoensis* K. C. Kuan et Z. X. An)、小丛红景天 [*Rhodiola dumulosa* (Franch.) S. H. Fu]、冰草 [*Agropyron cristatum* (L.) Gaertn.]、白草 (*Pennisetum centrasiaticum* Tzvel.) 和马先蒿 (*Pedicularis* sp.) 等。在这一区域内, 植被碳密度为 (0.512 8 ± 0.029 6)

kg · m⁻², 纬度每向北递增 1°, 植被碳密度减少 (0.426 7 ± 0.020 2) kg · m⁻²。

基于上述分析结果, 采用二次多项式逐步回归分析方法, 建立的青藏高原高寒草原生态系统南北样带内植被碳密度 (DVC) 与纬度 (n) 之间的标准化回归方程为: $DVC = -220.4153 + 14.6747n - 0.2433n^2$ (n=5, R=0.9772**), 由此方程可以看出, 南北样带内植被碳密度与纬度间的相关性极显著。在北纬 28°46' ~ 31°40', 南北样带内植被碳密度随纬度的增加而增加, 当纬度达到一定值后, 植被碳密度则随着纬度的增加而减少, 在南北样带内呈现出随纬度增加植被碳密度中间高、南北低的变化趋势, 植被碳密度增加与减少的纬度拐点约为北纬 30°16', 在此纬度上拟合的南北样带内植被碳密度的最大值为 0.873 1 kg · m⁻²。

2.1.2 植被碳密度的梯度分布与气候因子的关系
用二次多项式逐步回归分析法建立的南北样带内植被碳密度 (DVC) 与年均降水量 (p) 和年均气温 (t) 之间的标准化回归方程为: $DVC = -2.5733 + 0.0077p - 0.0390t^2 - 0.0002pt$ (n=5, R=0.9979**, R_p=0.9978**, R_t=-0.9851**, R_{pt}=-0.9945**)。从该方程中可以看出, 青藏高原高寒草原生态系统南北样带内植被碳密度与年均降水量和年均气温之间的偏相关系数及回归方程的相关系数均达到极显著水平, 这表明青藏高原高寒草原生态系统南北样带内植被碳密度的梯度变化是年均降水量和年均气温综合作用的结果, 且在青藏高原高寒草原生态系统南北样带内年均降水量对植被碳密度的影响略大于年均气温的影响。

由此方程还可以看出, 青藏高原高寒草原南北样带内植被碳密度与年均气温之间的相关性极显著。在北纬 28°46' ~ 31°40', 南北样带内植被碳密度随着年均气温和年均降水量的增加而增加, 当年均气温和年均降水量达到一定程度后, 南北样带内植被碳密度则随年均气温和年均降水量的增加而减少, 植被碳密度增加与减少的年均气温拐点约为 -1.5 °C, 年均降水量拐点约为 497.0 mm, 在此气候条件下拟合的南北样带内植被碳密度的最大值为 1.329 6 kg · m⁻²。南北样带内植被碳密度随着年均气温和年均降水量变化的这一分布规律可能与青藏高原高寒草原植被成分总体上属高寒干旱类型有关, 也与该区域气温过高或过低、降水量过多或过少, 不利于植被碳密度的积累有关。

2.2 东西样带内植被碳密度的梯度分布及其与气候因子的关系

2.2.1 植被碳密度的梯度分布特征 研究结果表明,青藏高原高寒草原生态系统的东西样带内植被碳密度为 $(0.2188 \pm 0.1861) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 变异系数为85.03%。在不同的高寒草原生态系统中,植被碳密度在东西样带梯度上的分布也不同。

样带西部区域属喀喇昆仑山支脉羌臣摩山和岗底斯山余脉班公山—昂龙岗日山脉挟持的班公错断层构造带湖盆和改则—伦坡拉构造宽谷,地理位置为东经 $80^{\circ}02' \sim 84^{\circ}48'$,谷地平均海拔约为4500 m,相对高差为200~400 m;该区域位于青藏高原的最西端,沿雅鲁藏布江和怒江谷地上溯的水汽不易到达,该区域是青藏高原最干旱的地区之一;年均气温为 $0.1^{\circ}\text{C} \sim 0.7^{\circ}\text{C}$,年均降水量在170 mm以下,全年降水量的77.6%~93.0%集中在6月份至9月份。在这种高寒干旱气候条件下,该区域广泛发育着以紫花针茅为优势种、沙生针茅(*Stipa glareosa* P. Smirn.)为次优势种的紫花针茅+沙生针茅草地型植被群落,伴生种类有羽柱针茅[*Stipa subsessiliflora* (Rupr.) Roshev. var. *basiphumosa* (Munro et Hook. f.) P. C. Kuo et Y. H. Sun]、燥原芥[*Ptilotricum canescens* (DC.) C. A. Mey.]、冰川棘豆(*Oxytropis glacialis* Benth. ex Bunge)、黄耆[*Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bunge]、二裂委陵菜、轮叶棘豆(*Oxytropis chiliophylla* Royle ex Benth.)和长爪黄耆(*Astragalus hendersonii* Baker)等;或发育着以紫花针茅为优势种、固沙草为次优势种的紫花针茅+固沙草草地型植被群落,伴生种类有二裂委陵菜、燥原芥、轮叶棘豆、砂生地蔷薇(*Chamaerhodos sabulosa* Bunge)和藏沙蒿等。在这一区域内,植被碳密度为 $(0.0991 \pm 0.0089) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,经度每递增 1° ,植被碳密度增加 $(0.0025 \pm 0.0012) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

样带中部区域在地形上主要由岗底斯山脉北侧的一系列山地及镶嵌其间的构造湖盆组成,地理位置为东经 $84^{\circ}48' \sim 90^{\circ}03'$ 。在这种高寒干旱气候条件下,该区域广泛发育着以紫花针茅为优势种、藏沙蒿为次优势种的紫花针茅+藏沙蒿草地型植被群落,伴生种类有燥原芥、垫型蒿(*Artemisia minor* Jacq. ex Bess.)、小叶棘豆[*Oxytropis microphylla* (Pall.) DC.]和沙蒿(*Artemisia desertorum* Spreng.)等;或发育着以紫花针茅为单一优势种,二裂委陵菜、早熟禾、细叶藁草

[*Carex duriuscula* C. A. Mey. subsp. *stenophylloides* (V. Krecz.) S. Y. Liang et Y. C. Tang]、青藏藁草、燥原芥、小叶棘豆和沙蒿等为伴生种的紫花针茅草地型植被群落。在这一区域内,植被碳密度为 $(0.3150 \pm 0.0223) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,经度每递增 1° ,植被碳密度增加 $(0.0371 \pm 0.0017) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

样带东部区域地处藏北内外流分水岭西侧和班戈盆地东部,地理位置为东经 $90^{\circ}03' \sim 91^{\circ}50'$,除北侧唐古拉山,南缘念青唐古拉山和盆地中一些海拔5500~5600 m山峰的短小山脉外,绝大部分是开阔的丘陵、高原和湖盆,盆地底部海拔约为4500 m,属藏北内外流分水岭山原地貌;该区域地处藏北内外流分水岭西侧,每年的下半年受印度洋季风暖湿气流的影响相对减弱,气候较为干旱,年均降水量为300~400 mm,年均气温为 $-1.2^{\circ}\text{C} \sim 3.0^{\circ}\text{C}$ 。在这种气候条件下,该区域广泛发育着以青藏藁草和紫花针茅为优势种的青藏藁草+紫花针茅草地型植被群落,伴生种类有丝颖针茅、羊茅、毛香火绒草、二裂委陵菜和纤杆蒿等;或发育着以紫花针茅为单一优势种,早熟禾、细叶藁草、狼毒、藏北高原芥、小丛红景天、冰草、白草和马先蒿等为伴生种的紫花针茅+杂类草草地型植被群落;或发育着以紫花针茅为单一优势种,二裂委陵菜、燥原芥、细叶藁草、小叶棘豆、早熟禾、羊茅、青藏藁草、冰草和沙蒿等为伴生种的紫花针茅草地型植被群落。在这一区域内,植被碳密度为 $(0.5135 \pm 0.0363) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,经度每递增 1° ,植被碳密度减少 $(0.1167 \pm 0.0137) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

基于上述分析结果建立的青藏高原高寒草原生态系统东西样带内植被碳密度(DVC)与经度(e)之间的一元非线性回归方程为: $DVC = 0.0001 \times \exp(0.1971e)$ ($n=5, R=0.9760^{**}$)。由该方程可以看出,东西样带内植被碳密度与经度之间有极显著的相关性。在东经 $80^{\circ}02' \sim 91^{\circ}50'$ 之间,东西样带内植被碳密度随经度的增加而增加,呈现出植被碳密度东高西低的变化趋势。

2.2.2 植被碳密度的梯度分布与气候因子的关系 用二次多项式逐步回归分析法建立的的东西样带内植被碳密度(DVC)与年均降水量(p)和年均气温(t)之间的标准化回归方程为: $DVC = 0.1848 - 0.0024p + 0.0001p^2 + 0.0005pt$ ($n=5, R_p = -0.9321^*$, $R_{pt} = 0.9444^*$, $R_{pt} = 0.9068^*$)。从该方程中可以看出,青藏高原高寒草原生态系统东西样带内植被碳密度

与年均降水量和年均气温之间的偏相关系数及方程的相关系数均达到显著水平,这表明青藏高原高寒草原生态系统南北样带内植被碳密度的梯度变化是年均降水量和年均气温综合作用的结果,且青藏高原高寒草原生态系统东西样带内年均降水量对植被碳密度的影响略大于年均气温的影响。

由此方程还可以看出,青藏高原高寒草原生态系统东西样带内植被碳密度与年均气温之间的相关性极显著。在东经 $80^{\circ}02' \sim 91^{\circ}50'$ 之间,东西样带内植被碳密度随着年均气温和年均降水量的增加而增加,当年均气温和年均降水量达到一定值后,东西样带内植被碳密度则随年均气温和年均降水量的增加而减少,植被碳密度增加与减少的年均气温拐点约为 0.7°C ,年均降水量拐点约为 409.0 mm 。在此气候条件下拟合的东西样带内植被碳密度的最大值为 $1.2083\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。东西样带内植被碳密度随着年均气温和年均降水量变化的这一分布规律可能与青藏高原高寒草原植被成分总体上属高寒干旱类型有关,也与这一区域的气温过高或过低、降水量过多或过少,不利于植被碳密度积累有关。

3 讨论和结论

利用植被和土壤实测数据对青藏高原高寒草原生态系统中南北样带和东西样带内的植被碳密度进行了估算,结果显示,南北样带内植被碳密度为 $(0.5690 \pm 0.2749)\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,东西样带内植被碳密度为 $(0.2188 \pm 0.1861)\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,高于中国稀疏灌丛植被碳密度 $(0.11\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2})$ ^[28]、高寒草甸植被碳密度 $(0.20\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2})$ 、高寒草原植被碳密度 $(0.14\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2})$ ^[29] 和雀儿山西南坡草原植被碳密度 $(0.093\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2})$ ^[30] 的水平,但低于中国平均草地植被碳密度 $(3.77\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2})$ ^[31]、灌草丛植被碳密度 $(2.189\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2})$ ^[32]、甘肃小陇山林区森林植被层平均碳密度 $(3.9425\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2})$ ^[33]、中国有林草地植被碳密度 $(2.90\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2})$ 、农田植被碳密度 $(0.57\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2})$ 、郁闭灌丛植被碳密度 $(1.20\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2})$ 和中国植被平均植被碳密度 $(1.47\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2})$ ^[28] 的水平。由此可见,在青藏高原高寒草原生态系统中,无论是在南北样带还是东西样带内,植被碳密度均处于较低水平。这可能是因为青藏高原地质史较为年轻,且地势高、降水较少、气温较低,在这种地理环境条件下,草地植被的初

级生物量较低、土壤有机质积累较少;此外,也可能与青藏高原所处的独特的地理位置和复杂的生态环境有关。

由上述研究结果还可看出,青藏高原高寒草原生态系统南北样带和东西样带的植被碳密度分布规律各不相同。在北纬 $28^{\circ}46' \sim 31^{\circ}40'$ 之间,南北样带内植被碳密度随着纬度的增加而增加,当纬度约为北纬 $30^{\circ}16'$ 时,南北样带内植被碳密度的最大拟合值为 $0.8731\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,之后,南北样带内植被碳密度随着纬度的增加而减少,呈现出中间高、南北低的变化趋势。在东经 $80^{\circ}02' \sim 91^{\circ}50'$ 之间,东西样带内植被碳密度随着经度的增加而增加,呈现出东高西低的变化趋势。植被碳密度的这一分布趋势与样带内植被的分布规律相一致。

此外,在青藏高原高寒草原生态系统南北样带内,植被碳密度与年均降水量、年均气温之间的偏相关系数及方程的相关系数均达到极显著水平,植被碳密度随年均气温和年均降水量的增加而增加,当年均气温达到约 -1.5°C 、年均降水量达到约 497.0 mm 时,植被碳密度的最大拟合值为 $1.3296\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$;之后,南北样带内植被碳密度随年均气温和年均降水量的增加而减少。在青藏高原高寒草原生态系统东西样带内,植被碳密度与年均降水量和年均气温之间的偏相关系数及方程的相关系数也均达到显著水平,植被碳密度先随着年均气温和年均降水量的增加而增加,当年均气温达到约 0.7°C 、年均降水量达到约 409.0 mm 时,东西样带内植被碳密度最大拟合值为 $1.2083\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,之后,东西样带内植被碳密度也随年均气温和年均降水量的增加而减少。

以上分析结果表明,在青藏高原高寒草原生态系统中,无论是在东西样带还是南北样带内,植被碳密度的分布均是年均降水量和年均气温综合作用的结果,且年均降水量对植被碳密度的影响均大于年均气温的影响,这可能与青藏高原高寒草原植被成分总体上属高寒干旱类型有关,也与这一区域的气温过高或过低、降水量过多或过少,不利于植被碳密度的积累有关。

参考文献:

- [1] 赵敏,周广胜. 中国森林生态系统的植物碳贮量及其影响因素分析[J]. 地理科学, 2004, 24(1): 50-54.
- [2] 周玉荣,于振良,赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡[J]. 植物生态学报, 2000, 24(5): 518-522.

- [3] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量[J]. 生态学报, 1996, 16(5): 497-508.
- [4] 王效科, 冯宗炜, 欧阳志云. 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(1): 13-16.
- [5] 张城, 王绍强, 于贵瑞, 等. 中国东部地区典型森林类型土壤有机碳储量分析[J]. 资源科学, 2006, 28(2): 97-102.
- [6] 朴世龙, 方精云, 贺金生, 等. 中国草地植被生物量及其空间分布格局[J]. 植物生态学报, 2004, 28(4): 491-498.
- [7] 王根绪, 程国栋, 沈永平. 青藏高原草地土壤有机碳库及其全球意义[J]. 冰川冻土, 2002, 24(6): 693-700.
- [8] 李文华, 周兴民. 青藏高原生态系统及优化利用模式[M]. 广州: 广东科学技术出版社, 1998: 244-270.
- [9] 徐玲玲, 张宪洲, 石培礼, 等. 青藏高原高寒草甸生态系统净二氧化碳交换量特征[J]. 生态学报, 2005, 25(8): 1948-1952.
- [10] 张宪洲, 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] 常天军, 王建林, 李鹏, 等. 藏北高寒草地植被的碳密度与碳贮量[J]. 生态科学, 2007, 26(5): 437-442.
- [12] 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: 62-287.
- [13] 西藏自治区土地管理局, 西藏自治区畜牧局. 西藏自治区草地资源[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 156-162.
- [14] 西藏自治区山南地区农牧局. 西藏山南土地资源[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1991: 132-167.
- [15] 西藏自治区日喀则地区农牧局. 西藏日喀则地区土地资源[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1993: 98-165.
- [16] 西藏自治区阿里地区农牧局. 西藏阿里土地资源[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1991: 162-173.
- [17] 西藏自治区拉萨市农牧局. 西藏拉萨土地资源[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1993: 102-145.
- [18] 西藏自治区昌都地区农牧局. 西藏昌都地区土地资源[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1993: 166-234.
- [19] 西藏自治区林芝地区农牧局. 西藏林芝地区土地资源[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1992: 30-48.
- [20] 张天增, 姚祖芳. 西藏那曲地区土地资源[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1992: 34-52.
- [21] 西藏自治区土地管理局, 西藏自治区畜牧局. 西藏自治区草地资源图1:200万[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 1.
- [22] 西藏自治区土地管理局. 西藏自治区土种志[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 8-21.
- [23] 西藏自治区土地管理局. 西藏自治区土壤资源[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 45-92.
- [24] 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏自然地理[M]. 北京: 科学出版社, 1982: 145-183.
- [25] 向杨. 西藏国土资源[M]. 拉萨: 西藏人民出版社, 1987: 102-198.
- [26] 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏气候[M]. 北京: 科学出版社, 1984: 67-212.
- [27] 唐启义, 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, 2002: 198-265.
- [28] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 2003, 33(1): 72-80.
- [29] 王绍强, 周成虎, 罗承文. 中国陆地自然植被碳量空间分布特征探讨[J]. 地理科学进展, 1999, 18(3): 238-244.
- [30] 张林, 张世熔, 李婷, 等. 雀儿山西南坡植被碳贮量估算及影响因素分析[J]. 四川环境, 2007, 26(1): 27-32.
- [31] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981—2000年中国陆地植被碳汇的估算[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 2007, 37(6): 804-812.
- [32] Fang J Y, Piao S L, Field C B, et al. Increasing net primary production in China from 1982 to 1999[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2003, 1(6): 293-297.
- [33] 程堂仁, 冯菁, 马钦彦, 等. 甘肃小陇山森林植被碳库及其分配特征[J]. 生态学报, 2008, 28(1): 33-44.

《植物资源与环境学报》2009年审稿专家名单

《植物资源与环境学报》2009年审稿专家名单如下(按姓氏的汉语拼音排序):

曹福亮	陈崇顺	陈树元	陈由强	戴传超	邓懋彬	邓小江	丁小余	丁雨龙	方升佐	方炎明
冯煦	高捍东	郭巧生	韩召军	杭悦宇	郝日明	黄苏珍	蒋建勤	焦德茂	李法曾	李国强
李美	李明阳	李朋富	李维林	李亚	李英年	李正才	梁呈元	梁敬钰	林思祖	林玉锁
刘建秀	刘启新	刘世家	刘学军	陆长梅	彭峰	钱虎君	强胜	乔玉山	任冰如	上官铁梁
沈振国	宋小玲	万树青	王广东	王贵禧	王火焰	王家福	王强	吴承祯	吴鹏程	夏冰
薛建辉	殷云龙	于顺利	张涵庆	张金池	张小平	章镇	赵伯涛	郑玉红	周永红	朱月林

本刊对各位审稿专家的支持表示诚挚的感谢。