

DOI: 10.5846/stxb201410152030

温丁,何念鹏.中国森林和草地凋落物现存量的空间分布格局及其控制因素.生态学报,2016,36(10): - .

Wen D, He N P. Spatial patterns of litter density and their controlling factors in forests and grasslands of China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(10): - .

中国森林和草地凋落物现存量的空间分布格局及其控制因素

温 丁^{1, 2}, 何念鹏^{1, *}

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:凋落物是陆地生态系统的重要组成部分,它对生态系统的养分循环非常重要。凋落物现存量是凋落物输入量与分解量的净累积量,理论上影响凋落物输入过程和分解过程的因素都会对凋落物现存量产生重要影响。目前,我国科学家对部分区域典型陆地生态系统凋落物现存量及其影响因素进行了探讨,迄今为止,全国尺度下的关于凋落物现存量评估的结果还未见报道。因此,如何准确地评估凋落物现存量对揭示生态系统应对全球变化具有重要意义。本文收集了 2000—2014 年公开发表文献中的森林和草地凋落物现存量数据(共 1864 个样点),并结合气候、土壤和地上生产力探讨了中国森林和草地凋落物现存量的空间格局及其主要控制因素,此外,还利用森林和草地凋落物的碳氮含量,结合凋落物现存量估算了不同区域和全国尺度的凋落物的碳氮贮量。分析结果表明:中国森林和草地的凋落物现存量存在较弱的经度和纬度格局,然而按照不同经度和纬度间隔整理数据后凋落物现存量表现出显著的空间分布格局。森林的凋落物现存量表现为随着经度和纬度的增加而逐渐增加,主要控制因素为温度。草地的凋落物现存量表现为随着经度的增加而逐渐升高,其主要影响因素为降水。森林和草地凋落物现存量在局部(或区域内)存在非常大的变异,这是造成其大尺度格局较弱的重要原因。结合 1:100 万中国植被图的森林和草地面积数据,本文估算出中国森林的凋落物现存量约为 1135.56 Tg,其碳氮贮量约为 517.93 TgC 和 15.33 TgN;此外,中国草地的凋落物现存量约为 119.63 Tg,其碳氮贮量分别为 47.11 TgC 和 1.59 TgN。本文首次尝试对全国尺度森林和草地凋落物现存量及其碳氮贮量进行估算,其研究结论有助于揭示凋落物在碳氮循环中的重要作用,并可为准确评估中国陆地生态系统碳氮贮量提供重要参考。

关键词:凋落物;碳贮量;氮贮量;空间格局;通径分析

Spatial patterns of litter density and their controlling factors in forests and grasslands of China

WEN Ding^{1,2}, HE Nianpeng^{1,*}

1 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Litter is an important component of terrestrial ecosystems and plays significant role in nutrient cycles. The accumulation of litter (or litter density) on the soil surface depends on the balance of the process of litter input and decomposition. Theoretically, any factors influencing the processes of litter input or decomposition will affect the accumulation of litter. Therefore, the accurate assessment of litter density is important in illustrating the ecosystem response of carbon (C) and nitrogen (N) cycles to global climate change. However, to date in China, spatial patterns of litter

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项—应对气候变化的碳收支认证及相关问题(XDA05050702);国家自然科学基金重大项目(31290221);中科院地理所可桢杰出青年人才项目(2013RC102)

收稿日期:2014-10-15; 网络出版日期:2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: henp@igsnrr.ac.cn

density and their influencing factors have not been reported. In this study, we collected the litter density data of forests and grasslands in China, published from 2000 to 2014; the data of 1864 sampling sites, including litter density, mean annual precipitation, mean annual temperature, climate, soil, and productivity, were obtained to explore the spatial patterns of litter density and their main controlling factors. In addition, we estimated the C and N storages of litter at different scales and the total C and N contents of forests and grasslands in China. Our results showed that the litter density in the forests and grasslands of China exhibited weak latitudinal and longitudinal distribution patterns; however, after the division with a different latitudinal and longitudinal interval, it showed significant spatial distribution. Litter density in the forests increased with increasing latitude and longitude and was mainly controlled by temperature. Litter density in the grasslands increased with increasing longitude; the main controlling factor of spatial patterns was precipitation. Apparent variations in the litter density were observed at the local or regional scale for forests and grasslands, which attenuated the expected spatial patterns of litter density. The total estimated amount of litter in the forests was 1135.56 Tg, and the C and N storages were 517.93 TgC and 15.33 TgN, respectively. The total amount of litter in the grasslands was 119.63 Tg, with 47.11 TgC and 1.59 TgN. To the best of our knowledge, this is the first study to evaluating the spatial patterns and C and N storages of litter in the forests and grasslands of China, which provide important information on the significance of litter in ecosystem nutrient cycles, especially for the accurate estimation of C and N storages in terrestrial ecosystems at the national scale.

Key Words: litter; carbon storage; nitrogen storage; spatial analysis; path analysis

凋落物是陆地生态系统的重要组成部分,是地上植物组分和养分归还到土壤的重要途径;凋落物现存量常指7—8月份在特定生态系统地表保存的凋落物数量,是凋落物输入与分解后的净累积量^[1-2]。当凋落物掉落到地表时,就开始了生物、物理和化学的分解过程,具体包括水溶性化合物的淋溶、土壤动物对凋落物的破碎和微生物分解等过程^[3]。凋落物通过分解释放植物所需养分,同时释放 CO₂,从而参与陆地生态系统的物质循环过程^[4]。如何准确地评估凋落物产量和现存量对揭示生态系统养分循环和凋落物碳氮贮量具有重要意义。

凋落物现存量是凋落物输入与分解后的净累积量,理论上影响凋落物输入过程和分解过程的因素都会对凋落物现存量产生重要影响。首先,群落生产力和演替阶段对凋落物产量具有重要影响^[5-7];其次,气候、土壤动物、土壤微生物和土壤基质等共同影响着凋落物的分解过程^[8-10];此外,凋落物自身理化性质,尤其是氮、磷和木质素的含量,也会对凋落物分解过程产生重要影响^[11-13]。我国科学家已对部分区域或典型生态系统的凋落物现存量及其控制因素进行了探讨^[14-15];然而,迄今为止全国尺度的森林和草地凋落物现存量的评估却还未见报道。宋新章等^[16]通过调查发现气候因子和土壤基质质量是影响我国森林凋落物分解的主导因素;Taylor 等^[17]研究发现,在分解前期,氮含量制约着凋落物的分解速率;在分解后期,木质素含量或木质素/N 是凋落物分解速率的主要影响因子。根据前人的研究结果,我们推测中国森林和草地凋落物现存量应该存在特定的空间格局,但由于我国森林和草地的空间分布格局及其水热条件的不同,其主要控制因素理应不同。

本文通过收集历史文献数据,共在全国范围内获得了 1864 个样点的凋落物现存量数据、气候和土壤数据,系统地探讨了中国森林和草地凋落物现存量的空间格局及其主要控制因素。本文主要目的:1)揭示中国森林和草地凋落物现存量的分布格局;2)探讨全国尺度下森林和草地凋落物现存量的主要控制因素及其机制;3)估算中国森林和草地凋落物现存量及其碳氮贮量。

1 数据收集与分析方法

1.1 数据来源及处理

1.1.1 凋落物现存量数据的获取

通过 Web of Science 和中国期刊网,本文收集了 2000—2014 年具有凋落物现存量数据的公开发表论文。

通过对文献数据的提取和整理,分别在森林和草地中提取了 1325 和 539 个样点的凋落物现存量数据 (g/m^2) (图 1)。本文所指的凋落物现存量均是指各个样点 7—8 月份地表的凋落量,而非凋落物产量。

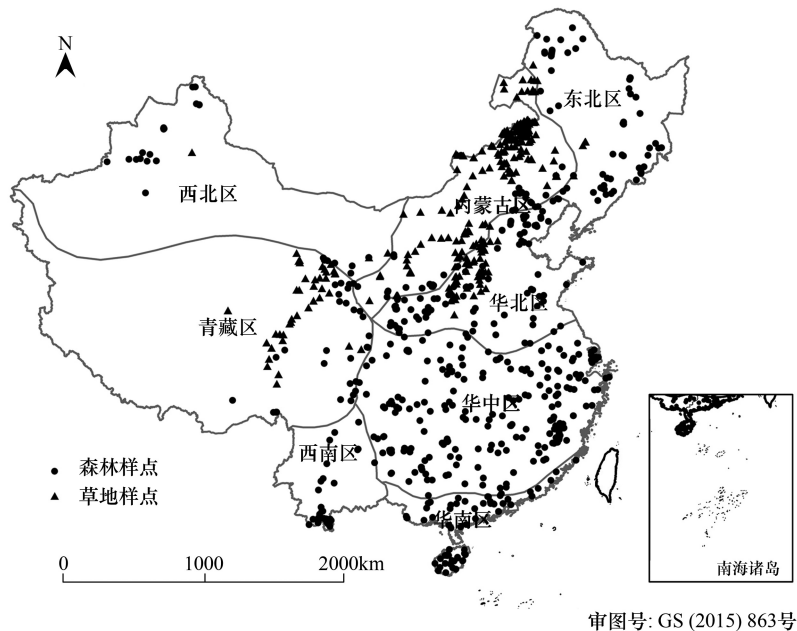


图 1 中国森林和草地凋落物现存量的样点分布图

Fig.1 The distribution of samples for litter density in Chinese forests and grasslands

1.1.2 其它数据的获取

在提取凋落物现存量的同时,我们还提取了土壤数据,如土壤有机质、pH 和土壤粒级等数据;对部分数据缺失的站点,根据样点的 GPS 坐标从全国土种志数据的插值中获得。各个站点 1960—2010 年气象数据、土壤碳氮贮量、森林生态系统的地上生物量、林龄和海拔等数据是从国家科技基础条件平台—地球系统科学数据共享平台申请获得(<http://www.geodata.cn/>)。草地上生物量数据是在提取凋落物现存量数据的同时提取的。

干燥度是根据其与年均温和年均降的关系推算得到^[18]。计算公式如下:

$$I_{dM} = \frac{P}{T + 10} \quad (1)$$

式中, I_{dM} 为 de Martonne 干燥度, P 为年平均降水量 (mm), T 为年平均温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

经过对上述多源数据的整理,我们建立了森林凋落物现存量的主要影响因素数据集,具体包括:1) 影响输入量的参数:地上生物量、林龄和海拔;2) 影响凋落物分解的因素:年均温、年降水、干燥度、土壤碳贮量、土壤氮贮量、pH、土壤有机质和土壤质地(粘粒、粉粒、沙粒)。类似地,草地凋落物现存量的主要影响因素数据集包括:1) 影响输入量的参数:地上生物量;2) 影响凋落物分解的主要因素:年均温、年降水、干燥度、土壤碳贮量、土壤氮贮量、土壤有机质和土壤质地(粘粒、粉粒、沙粒)。

由于文献中缺乏凋落物现存量中的碳氮含量,因此我们利用了(中国东部森林样带)从呼中到尖峰岭 9 个主要森林类型 36 个样地凋落物现存量的碳氮含量,来推算中国森林凋落物现存量的平均碳氮含量。类似的,我们利用内蒙古和西藏地区 9 个地点 90 个草地样方凋落物的碳氮含量,来推算中国草地凋落物的碳氮含量。在此基础上,结合凋落物现存量估算了不同区域和全国尺度的凋落物碳氮贮量。

1.2 分析与统计方法

首先,我们对凋落物现存量进行了描述性统计分析,获得数据的分布情况及变异程度。再结合我国森林

和草地分布特点分别对森林和草地凋落物现存量的空间分布格局进行了探讨。根据凋落物现存量数据的分布特征,结合 1:100 万植被分布图的面积数据,估算了不同区域和全国尺度的森林和草地凋落物现存量。此外,利用通径分析探讨了影响森林和草地凋落物现存量的主控因素。本研究考虑的影响因素相对较多,且因素间存在较复杂的相关关系,因此,我们通过逐步回归分析提取了与凋落物显著相关的因子,再将所选取的因素采用通径分析来探讨其对凋落物现存量的直接和间接效应。所有统计分析和作图均在 SPSS 13.0 和 Origin8.0 软件完成。

2 结果与分析

2.1 凋落物现存量的分布特征及分布格局

2.1.1 凋落物现存量的分布特征

不论是森林还是草地,其凋落物现存量的密度均存在较大标准偏差和变异系数(图 2)。其中,全国尺度的森林凋落物现存量的平均值为 466.52 g/m^2 ,最小值为 2.8 g/m^2 ,最大值为 5947 g/m^2 (图 2A);草地凋落物现存量的平均值为 58.78 g/m^2 ,最小值为 0.76 g/m^2 ,最大值为 430.11 g/m^2 (图 2B);森林和草地合并统计后,凋落物现存量的平均值为 462.35 g/m^2 ,最小值为 0.76 g/m^2 ,最大值为 5947 g/m^2 (图 2C)。

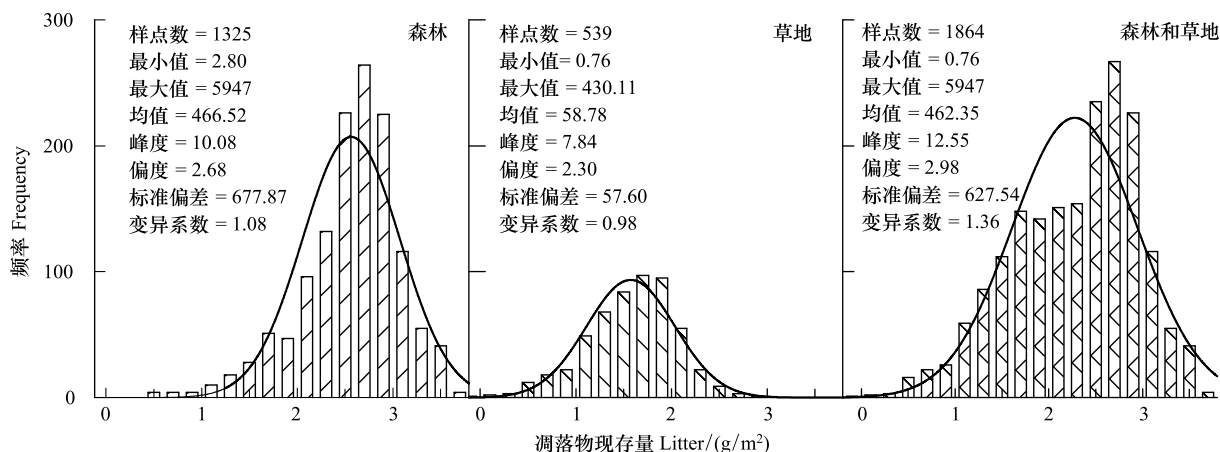


图 2 中国森林和草地凋落物现存量的频度分布图

Fig.2 Frequency distribution of litter density in Chinese forests and grasslands

横坐标是经 Log10 转化后的凋落物现存量,图中的统计特征是原始数据统计后的结果

2.1.2 凋落物现存量的分布格局

森林和草地的凋落物现存量存在较弱的空间分布格局(图表未给出);为了更清楚地探讨它们的分布格局,本研究从新将数据按 2 度的经度和纬度间隔进行整合,来揭示凋落物现存量随纬度和经度的变化趋势。分析结果表明:森林凋落物现存量在不同纬度 ($F=13.241$, $P<0.001$) 和经度 ($F=5.365$, $P<0.001$) 间差异显著;森林凋落物现存量存在显著经度和纬度空间分布格局,并随着经度和纬度的增加而增加(图 3A 和 D)。类似地,中国草地凋落物现存量也在不同纬度 ($F=2.398$, $P=0.005$) 和经度 ($F=3.090$, $P<0.001$) 间差异显著;草地凋落物现存量存在较明显的经度格局,并随经度增加而增加(图 3B, E);然而,未观察到明显的纬度格局。森林和草地合计后,凋落物现存量随经度增加而增加(图 3F),但未观测到明显的纬度格局(图 3C)。

2.2 凋落物现存量的主要影响因素

2.2.1 森林凋落物现存量的主控因素

通径分析结果表明:年均温和土壤粒级对森林凋落物现存量的贡献最大,起着显著的负效应,其通径系数分别为 -0.162 和 -0.161 (表 1)。年均温对凋落物现存量的直接作用高于粉粒,然而,粉粒通过土壤氮贮量对凋落物现存量的间接效应相对较大,其间接通径系数达到 -0.011 ,使得年均温通过其他因素对凋落物现存量

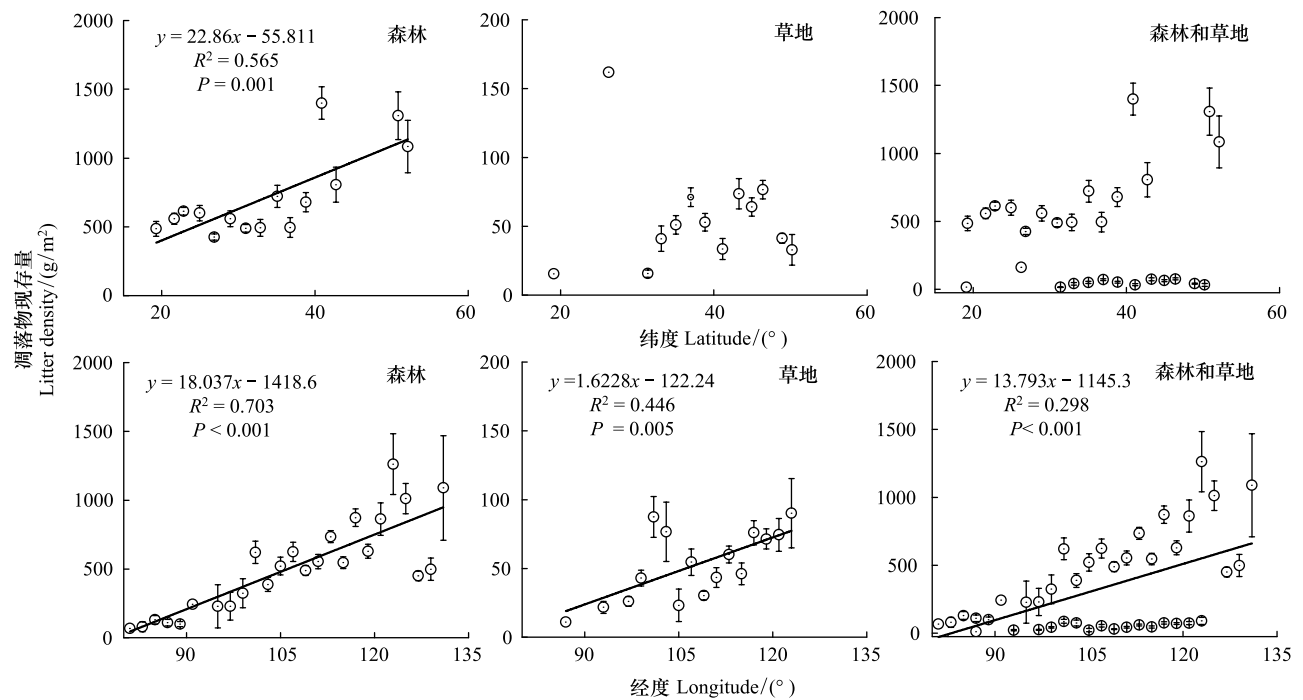


图 3 中国森林和草地凋落物现存量随经纬度的变化

Fig.3 Changes in litter density with latitude and longitude in Chinese forests and grasslands

的总间接作用远小于粉粒的间接作用,而地上生物量、土壤氮贮量对凋落物现存量的直接途径系数较小,同时间接途径系数也相对较低。

表 1 中国森林凋落物现存量主要影响因素的通路系数

影响因素 Factors	通路系数 (直接作用) Path coefficient (direct effect)	间接通路系数(间接作用) Indirect path coefficient (indirect effect)				
		粉粒/% Silt	年均温/℃ MAT	地上生物 量/(t/hm ²) AGB	土壤氮贮 量/(t/hm ²) Soil N storage	合计 Total effect
粉粒 Silt /%	-0.161 ***	-	0.000	-0.007	-0.011	-0.018
年均温 MAT /℃	-0.162 ***	0.000	-	-0.009	0.008	-0.001
地上生物量 AGB/(t/hm ²)	-0.060 *	-0.019	-0.026	-	0.003	-0.042
土壤氮贮量 Soil N storage/(t/hm ²)	0.090 ***	0.019	-0.014	-0.003	-	0.002

MAT:年均温 mean annual temperature;AGB:地上生物量 above-ground biomass; *: $P < 0.05$; ***: $P < 0.001$; +, -号表示对 Y 的正负作用

2.2.2 草地凋落物现存量的主控因素

草地凋落物现存量的主要控制因素分别为地上生物量、土壤碳贮量和降水量(表 2),其中地上生物量的直接途径系数达到 0.348,对凋落物现存量起着明显正效应。年降水量虽然对凋落物现存量的直接作用较小,但它通过其他因素对凋落物现存量的间接效应相对较大,其总效应 0.088,特别是年降水量通过地上生物量对凋落物现存量的间接途径系数达到了 0.072,使降水量对凋落物现存量的总作用为 0.170。而土壤质地对草地凋落物现存量的贡献相对较小。粘粒对凋落物现存量的直接作用不高,其总间接作用也相对较小。

2.3 中国森林和草地凋落物现存量及其碳氮贮量估算

2.3.1 森林和草地的凋落物现存量估算

据估算,中国森林凋落物现存总量约为 1135.56 Tg(表 3)。其中,东北区域凋落物现存量的密度最大(5947 g/m²),总贮量约为 360.25 Tg。华中区取样点数最多,为 460 个,而青藏区取样点数最少只有 49 个,两

者的凋落物现存量的平均值较小,分别为 450.18 g/m²和 491.69 g/m²。西北区、内蒙古区、华南区森林凋落物现存量密度较低、面积较小,其总贮量分别为 28.42 Tg、27.02 Tg 和 26.41 Tg。此外,表 3 也表明不同地区内的森林凋落物现存量变异性非常大,变异系数介于 0.52—1.63。

表 2 中国草地凋落物现存量主要影响因素的通路系数

Table 2 Path coefficients of main factors controlling litter density in Chinese grasslands						
影响因素 Factors	通路系数	间接通路系数(间接作用) Indirect path coefficient (indirect effect)				
	(直接作用)	地上生物	土壤碳贮	年降水/mm	粘粒/%	合计
	Path coefficient (direct effect)					
		量/(g/m ²) AGB	量/(t/hm ²) Soil N storage	MAP	Clay	Total effect
地上生物量 AGB/(g/m ²)	0.348 ***	—	0.016	0.017	−0.004	0.029
土壤碳贮量 Soil N storage/(t/hm ²)	0.142 ***	0.038	—	0.019	0.012	0.069
年降水 MAP/mm	0.082 *	0.072	0.032	—	−0.016	0.088
粘粒 Clay/%	−0.146 ***	0.009	−0.012	0.009	—	0.006

MAP:年降水 mean annual precipitation;AGB:地上生物量 above-ground biomass; *:P<0.05; * * *:P<0.001;+ −号表示对 Y 的正负作用

表 3 不同区域森林凋落物现存量统计特征

Table 3 Statistics of litter density for Chinese forests in different zones								
分区 Zone	NO.	最小值/ (g/m ²) Min	最大值/ (g/m ²) Max	均值/ (g/m ²) Mean	标准差 Standard deviation	变异系数 CV	森林面积/ (10 ⁶ ha) Forest area	总和/Tg Total
东北区 Northeast	160	6.00	5947.00	950.03	1049.11	1.10	37.92	360.25
华中区 Middle China	460	3.00	2934.00	491.69	396.18	0.81	50.06	246.14
青藏区 Qinghai-tibet	49	31.00	2560.00	450.18	472.40	1.05	44.70	201.23
华北区 North China	165	6.00	3647.00	931.58	831.47	0.89	20.31	189.20
西南区 Southwest	60	29.00	1410.00	462.47	240.14	0.52	12.30	56.88
西北区 Northwest	145	4.00	3660.00	456.92	742.92	1.63	6.22	28.42
内蒙古区 Inner Mongolia	91	10.00	3412.00	698.15	934.53	1.34	3.87	27.02
华南区 South China	195	17.00	1914.00	608.50	376.23	0.62	4.34	26.41

CV:变异系数 coefficient of variation,不同地区森林面积从 1:100 万植被图中提取^[19]

中国草地凋落物现存量约为 119.63 Tg(表 4)。其中,青藏高原草地凋落物现存量的平均密度为 50.3 g/m²,贮量约为 70.93 Tg。内蒙古草地凋落物现存量的平均密度为 58.78 g/m²,贮量约为 28.77 Tg。此外,华北和西北区草地的凋落物现存量约为 5.44 Tg 和 4.25 Tg。与森林类似,草地的凋落物现存量在不同区域内存在非常大的变异,变异系数 0.49—1.16 (表 4)。

表 4 不同区域草地生态系统凋落物现存量描述性统计

Table 4 Descriptive statistics of litter density for different zones of grassland ecosystem								
分区 Zone	NO.	最小值/ (g/m ²) Min	最大值/ (g/m ²) Max	均值/ (g/m ²) Mean	标准差 Standard deviation	变异系数 CV	草地面积/ (10 ⁶ ha) Grass area	总和/Tg Total
青藏区 Qinghai-tibet	125	1.00	216.00	50.30	48.082	0.96	141.02	70.93
内蒙古区 Inner Mongolia	342	1.00	430.00	58.78	59.86	1.02	48.94	28.77
东北区 Northeast	20	7.00	295.00	71.70	83.43	1.16	14.29	10.25
华北区 North China	47	11.00	228.00	80.77	46.12	0.57	6.73	5.44
西北区 Northwest	5	9.00	25.00	13.40	6.58	0.49	31.69	4.25

CV:变异系数 coefficient of variation,不同地区草地面积从 1:100 万植被图中提取^[19]

2.3.2 森林和草地凋落物现存量碳氮贮量估算

利用多个地点获得了凋落物现存量的碳氮含量,森林凋落物现存量的碳氮含量分别为 45.61%和 1.35%,

变异系数分别为 0.1 和 0.17(图 4 B);而草地凋落物现存量的碳氮含量分别为 39.55%和 1.33%,变异系数分别为 0.2 和 0.24(图 4 B)。据此推算,中国森林的凋落物现存量共贮存了 517.93 TgC 和 15.33 TgN,中国草地凋落物现存量的碳氮贮量分别为 47.11 TgC 和 1.59 TgN(图 4 C)。

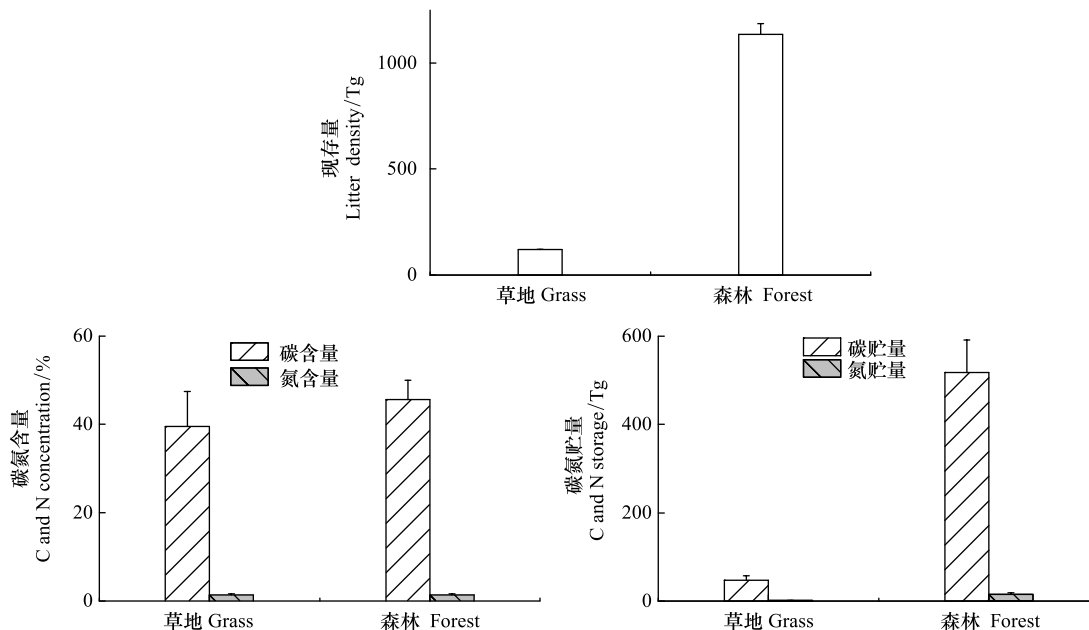


图 4 中国森林和草地凋落物现存量、碳氮含量与碳氮贮量

Fig.4 Litter and their C and N density and storage in Chinese forests and grasslands

误差条表示标准误差

3 讨论

3.1 凋落物现存量分布格局及数据不确定性分析

中国森林和草地的凋落物现存量表现出了较明显的经度或纬度格局。然而,由于同一地区不同样点间凋落物现存量存在非常大的变异(49—163%,表 3 和表 4),即存在非常大的取样的局部效应(Local effect),显著地降低了大尺度上的凋落物现存量的经度和纬度格局;从而表现为关系极显著,但 R^2 却非常低。凋落物现存量的数据是从公开发表论文中提取,不同研究间的数据源差异是造成显著局部效应的重要源泉;其可能原因如下:1) 取样时间和收集方法存在一定的差异;2) 采样点在地形和地势间的差异对结果具有重要影响;3) 森林或草地生态系统演替阶段的不同。本文的研究结果部分验证了我们的假设,即中国森林和草地的凋落物现存量存在特定的经度和纬度格局,但主要控制因素存在明显差异。森林生态系统中凋落物分解速率随纬度的增加而减少^[20-22];同时随着经度增加,土壤含水量也显著增加并影响凋落物的分解速率和碳氮周转^[23]。中国草地青藏区和内蒙古区分布较广,而东北和东南区草地分布较稀少;青藏和内蒙地区的草地存在显著的经度格局,该地区气温普遍偏低,较低的温度某种程度抑制了草地凋落物的分解^[24-25];因此,我国草地凋落物现存量更大取决于凋落物的输入量(或地上生物量),这也是中国草地凋落物现存量存在明显的经度格局的重要原因。

3.2 气候因子是凋落物现存量分布格局的主控因素

中国森林和草地的凋落物现存量受多种因素的共同控制,最重要的因素为气候因子;然而,森林和草地间存在主控因素(温度 VS 降水)和影响途径的明显差异。对森林而言,凋落物现存量的主要影响因素是年均气温和土壤粒级(表 1),此外,由于降水与土壤粒级和年均气温存在显著地相关性,因此我们认为气候是其起主导因素(相关性表未给出)。气候因子在大尺度下对凋落物分解起到了重要作用^[26-29],在气温不是限制因素

时,再多的凋落物输入量均会被分解,因此中国森林生态系统的凋落物现存量存在明显的纬度格局,并与森林地上生物(某种程度控制凋落物输入量)无显著的相关关系^[30-31]。Aerts 和 Ayres 等研究认为土壤质地是影响凋落物分解的关键因子,主要是质地对土壤水分保持与土壤水分含量具有重要的影响^[8,32]。总之,森林凋落物现存量受到气候因子和土壤因子等多方面的影响^[33],而地上生物量对凋落物现存量的直接作用非常小。此外,根据我国植被沿气候地带性分布特征,我们可以看出南方热带区地上生物量较多,而凋落物现存量较少,北方温带区则刚好相反;热带和亚热带区由于温度较高、土壤肥力较低,导致凋落物分解得更快,从而导致凋落物现存量与地上生物量存在一定的负相关关系。

对中国草地生态系统而言,凋落物现存量的主要影响因素是降水量和地上生物量(表2)。中国草地地上生物量和降水密切相关(相关性表未给出),并随生长期降雨量增加而极显著增加^[34];中国草地本身就表现出了较强的经度分布;因此,不论是内蒙古草地还是青藏草地,随着从东到西的经度的降低(或降水量的降低),其地上生产力或凋落物输入量均表现为降低的趋势^[24-25,35-36]。由于中国大多数草地地上生物量存在明显的经度格局,草地凋落物输入量与地上生物量(或当年生产力)密切相关^[37],是导致中国草地凋落物现存量存在明显经度格局的重要原因。此外,我国草地分布区的温度明显偏低(北方草地平均温度大多低于 0℃),过低的温度不利于凋落物的分解,从而使温度对草地凋落物现存量的空间分布格局的影响相对较小。

3.3 中国凋落物总量及碳氮贮量

中国森林和草地的凋落物现存量分别为 1135.56 Tg 和 119.63 Tg。中国森林凋落物现存量的碳氮贮量分别为 517.93 TgC 和 15.33 Tg N,中国草地凋落物现存量的碳氮贮量分别为 47.11 TgC 和 1.59 TgN。凋落物的碳氮贮量在整个森林或草地中所占比例不大^[38-39],碳氮更多是储存在土壤和植被;然而,中国森林和草地凋落物的碳贮量约为 0.56 PgC,也是重要的碳库,应给予一定的重视。此外,本文对中国森林和草地凋落物现存量的估算还存在一定的不确定性,仍需在未来的研究过程予以克服;主要包括:1)不同研究者对凋落物的取样地点和方法存在差异;2)森林和草地面积估算是依据 2000 年左右的植被图(张新时,1:100 万植被图^[19]),过去几十年的植被覆盖变化会造成统计面积上的差异;3)难以获取不同地点的凋落物现存量的碳氮含量,只能采用有限样点的平均值来进行估算。4)数据在空间分布上的不均一性,尤其是非热点区域数据量的不足将会对估算结果带来巨大的影响。因此,为了获得中国森林和草地凋落物现存量及其碳氮贮量的精确评估,未来需要按统一的和规范的方法,并在全中国尺度进行大规模取样。

4 结论

中国森林生态系统的凋落物现存量在经纬度上存在格局,随着经纬度的增加而升高;中国草地生态系统凋落物现存量只在经度上存在格局,随着经度的增加而升高。在全国尺度,影响森林凋落物现存量分布格局的关键因子是温度和土壤质地,而草地生态系统凋落物现存量的主要控制因素为降水。中国草地凋落物现存量约为 1135.56 Tg,碳氮贮量分别为 517.93 TgC 和 15.33 TgN;中国草地凋落物现存量约为 119.63 Tg,其碳氮贮量分别为 47.11 TgC 和 1.59 TgN。本文首次在全国尺度下对凋落物现存量及其碳氮贮量进行了估算,直接为准确评估我国陆地生态系统的碳氮贮量提供重要依据。

致谢:感谢国家地球系统科学数据共享平台(<http://www.geodata.cn/>)的大力支持及那些帮助收集和提取文献数据的研究生们。

参考文献(References):

- [1] Maguire D A. Branch mortality and potential litterfall from Douglas-fir trees in stands of varying density. *Forest Ecology and Management*, 1994, 70 (1/3): 41-53.
- [2] Witkamp M. Microbial populations of leaf litter in relation to environmental conditions and decomposition. *Ecology*, 1963, 44(2): 370-377.
- [3] Loranger G, Ponge J F, Imbert D, Lavelle P. Leaf decomposition in two semi-evergreen tropical forests: influence of litter quality. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(4): 247-252.

- [4] Prescott C E. Do rates of litter decomposition tell us anything we really need to know? *Forest Ecology and Management*, 2005, 220(1/3): 66-74.
- [5] 王静, 赵萌莉, Willms W, 王忠武, 韩国栋. 内蒙古典型草原不同功能群生产力对凋落物添加的响应. *植物生态学报*, 2010, 34(8): 907-914.
- [6] 彭少麟, 刘强. 森林凋落物动态及其对全球变暖的响应. *生态学报*, 2002, 22(9): 1534-1544.
- [7] 余广彬, 杨效东. 不同演替阶段热带森林地表凋落物和土壤节肢动物群落特征. *生物多样性*, 2007, 15(2): 188-198.
- [8] Aerts R. Climate, leaf litter chemistry and leaf litter decomposition in terrestrial ecosystems: a triangular relationship. *Oikos*, 1997, 79(3): 439-449.
- [9] Laiho R, Laine J, Trettin C C, Finér L. Scots pine litter decomposition along drainage succession and soil nutrient gradients in peatland forests, and the effects of inter-annual weather variation. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(7): 1095-1109.
- [10] Robinson C. Controls on decomposition and soil nitrogen availability at high latitudes. *Plant and Soil*, 2002, 242(1): 65-81.
- [11] Berg B, Johansson M B, Meentemeyer V. Litter decomposition in a transect of Norway spruce forests: substrate quality and climate control. *Canadian Journal of Forest Research*, 2000, 30(7): 1136-1147.
- [12] Moore T R, Trofymow J A, Taylor B, Prescott C, Camiré C, Duschene L, Fyles J, Kozak L, Kranabetter M, Morrison I, Siltanen M, Smith S, Titus B, Visser S, Wein R, Zoltai S. Litter decomposition rates in Canadian forests. *Global Change Biology*, 1999, 5(1): 75-82.
- [13] 李强, 周道玮, 陈笑莹. 地上枯落物的累积、分解及其在陆地生态系统中的作用. *生态学报*, 2014, 34(14): 3807-3819.
- [14] 张德强, 叶万辉, 余清发, 孔国辉, 张佑倡. 鼎湖山演替系列中代表性森林凋落物研究. *生态学报*, 2000, 20(6): 938-944.
- [15] 周东雄. 杉木乳源木莲混交林凋落物研究. *生态学杂志*, 2005, 24(6): 595-598.
- [16] 宋新章, 江洪, 马元丹, 余树全, 周国模, 彭少麟, 窦荣鹏, 郭培培. 中国东部气候带凋落物分解特征——气候和基质的综合影响. *生态学报*, 2009, 29(10): 5219-5226.
- [17] Taylor B R, Parkinson D, Parsons W F J. Nitrogen and lignin content as predictors of litter decay rates: a microcosm test. *Ecology*, 1989, 70(1): 97-104.
- [18] 孟猛, 倪健, 张治国. 地理生态学的干燥度指数及其应用评述. *植物生态学报*, 2004, 28(6): 853-861.
- [19] 张新时. 中华人民共和国 1:100 万植被图. 北京:地质出版社, 2007.
- [20] Starr M, Saarsalmi A, Hokkanen T, Merilä P, Helmisaari H-S. Models of litterfall production for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in Finland using stand, site and climate factors. *Forest Ecology and Management*, 2005, 205(1/3): 215-225.
- [21] Zhou G Y, Guan L L, Wei X H, Zhang D Q, Zhang Q M, Yan J H, Wen D Z, Liu J X, Liu S G, Huang Z L, Kong G H, Mo J M, Yu Q F. Litterfall production along successional and altitudinal gradients of subtropical monsoon evergreen broadleaved forests in Guangdong, China. *Plant Ecology*, 2007, 188(1): 77-89.
- [22] 李雪峰, 韩士杰, 李玉文, 侯炳柱, 李雪莲. 东北地区主要森林生态系统凋落量的比较. *应用生态学报*, 2005, 16(5): 783-788.
- [23] 周才平, 欧阳华. 温度和湿度对暖温带落叶阔叶林土壤氮矿化的影响. *植物生态学报*, 2001, 25(2): 204-209.
- [24] 陈效述, 郑婷. 内蒙古典型草原地上生物量的空间格局及其气候成因分析. *地理科学*, 2008, 28(3): 369-374.
- [25] 杨元合, 饶胜, 胡会峰, 陈安平, 吉成均, 朱彪, 左闻韵, 李轩然, 沈海花, 王志恒, 唐艳鸿, 方精云. 青藏高原高寒草地植物物种丰富度及其与环境因子和生物量的关系. *生物多样性*, 2004, 12(1): 200-205.
- [26] Berg B, Berg M P, Bottnar P, Box E, Breymeyer A, de Anta R C, Couteaux M, Escudero A, Gallardo A, Kratz W, Madeira M, Mäkönen E, McClaugherty C, Meentemeyer V, Muñoz F, Piussi P, Remacle J, de Santo A V. Litter mass loss rates in pine forests of Europe and Eastern United States: some relationships with climate and litter quality. *Biogeochemistry*, 1993, 20(3): 127-159.
- [27] Cornelissen J H C. An experimental comparison of leaf decomposition rates in a wide range of temperate plant species and types. *Journal of Ecology*, 1996, 84(4): 573-582.
- [28] Cornwell W K, Cornelissen J H C, Amatangelo K, Dorrepaal E, Eviner V T, Godoy O, Hobbie S E, Hoorens B, Kurokawa H, Pérez-Harguindeguy N, Quesada H M, Santiago L S, Wardle D A, Wright I J, Aerts R, Allison S D, Van Bodegom P, Brovkin V, Chatain A, Callaghan T V, Díaz S, Garnier E, Gurvich D E, Kazakou E, Klein J A, Read J, Reich P B, Soudzilovskaia N A, Vaieretti M V, Westoby M. Plant species traits are the predominant control on litter decomposition rates within biomes worldwide. *Ecology Letters*, 2008, 11(10): 1065-1071.
- [29] 张新平, 王襄平, 朱彪, 宗占江, 彭长辉, 方精云. 我国东北主要森林类型的凋落物产量及其影响因素. *植物生态学报*, 2008, 32(5): 1031-1040.
- [30] 吕国红, 李荣平, 温日红, 谢艳兵, 王笑影. 森林凋落物组分的气象影响分析. *中国农学通报*, 2014, 30(19): 1-6.
- [31] 徐旺明, 闫文德, 李洁冰, 赵晶, 王光军. 亚热带 4 种森林凋落物量及其动态特征. *生态学报*, 2013, 33(23): 7570-7575.
- [32] Ayres E, Dromph K M, Bardgett R D. Do plant species encourage soil biota that specialise in the rapid decomposition of their litter? *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(1): 183-186.
- [33] 王新源, 赵学勇, 李玉霖, 连杰, 曲浩, 岳祥飞. 环境因素对于旱半干旱区凋落物分解的影响研究进展. *应用生态学报*, 2013, 24(11): 3300-3310.
- [34] 邓蕾, 上官周平. 陕西省天然草地生物量空间分布格局及其影响因素. *草地学报*, 2012, 20(5): 825-835.
- [35] 朴世龙, 方精云, 贺金生, 肖玉. 中国草地植被生物量及其空间分布格局. *植物生态学报*, 2004, 28(4): 491-498.
- [36] 马文红, 杨元合, 贺金生, 曾辉, 方精云. 内蒙古温带草地生物量及其与环境因子的关系. *中国科学(C 辑:生命科学)*, 2008, 38(1): 84-92.
- [37] 郑淑华, 赵萌莉, 韩国栋, 红梅, 贵满全, 乌力吉. 不同放牧压力下典型草原土壤物理性质与植被关系的研究. *干旱区资源与环境*, 2005, 19(7): 199-203.
- [38] 黄宇, 冯宗炜, 汪思龙, 冯兆忠, 张红星, 徐永荣. 杉木、火力楠纯林及其混交林生态系统 C、N 贮量. *生态学报*, 2005, 25(12): 3146-3154.
- [39] 何念鹏, 韩兴国, 于贵瑞. 长期封育对不同类型草地碳贮量及其固持速率的影响. *生态学报*, 2011, 31(15): 4270-4276.