

# 科尔沁沙地不同生境植被凋落物年际及年内动态

王旭洋<sup>1,2</sup> 李玉强<sup>1\*</sup> 罗永清<sup>1</sup> 连杰<sup>1</sup> 牛亚毅<sup>1,2</sup> 龚相文<sup>1,2</sup> 杨欢<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000; <sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 凋落物是植被土壤系统之间重要的物质和能量通道之一,在生态脆弱区植被和土壤修复过程中发挥着特殊的功能和作用.以科尔沁沙地流动沙丘、固定沙丘和草地为对象,通过连续测定9个生长季凋落物量,并结合气温与降水量数据,研究沙地生态系统不同生境的凋落物年际和年内动态及其调控因子.结果表明:不同生境植被年凋落物大小依次为:流动沙丘( $9.01 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ) < 固定沙丘( $67.46 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ) < 草地( $119.55 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ).凋落物总量年际动态波动明显,固定沙丘年际变化呈“双峰”曲线,草地年际变化呈“W”型曲线.凋落物量年内变化均表现为“U”型曲线,在4和9月出现高峰值.降水量和气温对固定沙丘和草地凋落物量月际动态影响显著,而对不同生境条件下凋落物量年际变化影响均不显著.气温是影响该沙地生态系统生长季(4—9月)凋落物量月动态的主要因素.

**关键词** 科尔沁沙地; 生境; 凋落物

**Inter- and intra-annual dynamics of vegetation litter at different habitats in Horqin Sandy Land, China.** WANG Xu-yang<sup>1,2</sup>, LI Yu-qiang<sup>1\*</sup>, LUO Yong-qing<sup>1</sup>, LIAN Jie<sup>1</sup>, NIU Ya-yi<sup>1,2</sup>, GONG Xiang-wen<sup>1,2</sup>, YANG Huan<sup>1</sup> (<sup>1</sup>Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; <sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China).

**Abstract:** As one of the important pathways of material and energy flow between plant and soil system, litterfall plays a key role in the process of vegetation and soil restoration in ecologically fragile region. To explore the inter- and intra-annual dynamics of litter production and related regulatory factors at different habitats in sandy land ecosystem, we investigated the litter production during nine continuous growing seasons, while the air temperature and precipitation were measured over mobile dune, fixed dune, and grassland in Horqin Sandy Land. The results showed that annual litter production at different habitats were in the order of mobile dune ( $9.01 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ) < fixed dune ( $67.46 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ) < grassland ( $119.55 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ). The inter-annual dynamics of litterfall fluctuated significantly, with a double-peak curve in fixed dune and “W” curve in grassland. The intra-annual variation of litterfall exhibited a “U” curve at all the three habitats, with peaks appearing in April and September, respectively. Precipitation and temperature had significant effects on the intra-annual dynamics of litterfall production in fixed sand dune and grassland, but had no significant effect on the inter-annual dynamics of litter production at three habitats. Temperature was the major factor affecting the dynamics of the litter fall during the growing season in Horqin Sandy Land.

**Key words:** Horqin Sandy Land; habitat; litter.

植物体通过凋落物的形式将所积累的营养物质返回地表,经过分配与分解,将营养物质归返土壤,

从而实现生态系统的物质循环<sup>[1]</sup>.凋落物量作为生物量的重要组成部分,可以表征生态系统的初级生产力水平,是生态系统功能的体现<sup>[2]</sup>.同时,凋落物量的动态变化规律能反映外界环境对生态系统结构和功能的影响<sup>[3]</sup>.目前,国外主要在森林生态系统开展了凋落物及其分解动态的研究<sup>[4-8]</sup>,也进一步探究了植被群落结构和气候因子对凋落物量动态的影响机制<sup>[9-10]</sup>.国内对不同林种凋落物养分循环及归还也开展了大量研究<sup>[11-16]</sup>,但有关草地凋落物动态

本文由中国科学院百人计划项目(Y551821)、国家自然科学基金项目(31500369, 31640012, 31560161)和国家重点研发计划项目(2016YFC0500901)资助 This work was supported by the Pioneer Hundred Talents Program of the Chinese Academy of Sciences (Y551821), the National Natural Science Foundation of China (31500369, 31640012, 31560161), and the National Key Research and Development Program of China (2016YFC0500901).

2017-11-12 Received, 2018-02-12 Accepted.

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liyq@lzb.ac.cn

特征及其影响因子的研究尚少<sup>[17-18]</sup>,探究草地凋落物变化的驱动机制有待深入研究。

科尔沁沙地是我国沙漠化最严重的区域之一,地处我国半湿润与半干旱气候过渡区,以及农牧交错带的东端。该区域疏松的土壤结构导致土壤风蚀频发,土壤中有机质和养分伴随着强烈的风蚀极易发生流失,从而造成土壤贫瘠化和粗质化<sup>[19-20]</sup>。凋落物作为草地土壤有机质的重要来源,是保持土壤肥力的基础<sup>[21]</sup>。而凋落物对土壤的输入及矿化分解作用能够对沙质草地的土壤质地和养分的改善发挥重要作用,这也是增加土壤碳汇的关键途径<sup>[22]</sup>。此外,相对匮乏的水热资源限制了沙地植物根系物质的积累与释放,这导致根系向土壤的物质回馈较少,在沙地生态系统中凋落物向土壤的物质回馈显得愈加重要<sup>[23-24]</sup>。降水量和气温是表征气候状况最直观的两个因子,可以影响植被的生理及物候<sup>[14]</sup>。那么气象因子在影响植被生理节律之外,是否也会成为影响凋落物动态变化的驱动因子?为了解上述问题,本文采用时-空替代方法,立足于科尔沁沙地不同沙漠化程度的生境,即流动沙丘、固定沙丘和草地,连续测定并分析9个生长季凋落物量,结合同期气温和降水量数据,研究沙地恢复过程中不同生境凋落物的年际和年内动态及其对气温和降水量的响应机制,为退化生态系统恢复提供科学支持。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于科尔沁沙地腹地奈曼旗境内(42°55' N,120°42' E),平均海拔345 m(图1)。该地区属于温带大陆性半干旱气候,年均温6.1~6.5 °C,

平均最高和最低温分别为24.3 °C(7月)和-12.6 °C(1月),≥10 °C年积温3200 °C,无霜期150 d,年均降水量351.70 mm,70%~80%降水集中在6—8月,年均蒸发量1935 mm<sup>[22]</sup>。年均风速不低于5 m·s<sup>-1</sup>的侵蚀日数大于200 d,其中春季风速4.2~5.9 m·s<sup>-1</sup>。

研究区主要土壤类型为栗钙土、草甸土和风沙土<sup>[25]</sup>。主要植被类型为沙生半干旱草原植被和草甸植被,其中优势灌木主要有小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、黄柳(*Salix gordejewii*)和差巴嘎蒿(*Artemisia halodendrom*);优势草本植物有狗尾草(*Setaria viridis*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、白草(*Pennisetum centrasiaticum*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、沙米(*Agriophyllum squarrosum*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、雾冰藜(*Bassia dasphylla*)、地锦(*Euphorbia humifusa*)和砂蓝刺头(*Echinops gmelini*)等。

### 1.2 研究方法

试验于2007年4月—2015年9月在中国科学院奈曼沙漠化研究站进行。参照沙漠化程度评价体系<sup>[26]</sup>,以科尔沁沙地围封恢复措施下的流动沙丘、固定沙丘和草地3种不同生境为研究对象,其中,草地为流动沙丘围封30年的样地,3类样地分别选取10 m×10 m样方10块,各样方再设置一个1 m×1 m的小样方,于每年生长季开始(4月),采用样地随机布置凋落物收集框的方法逐月收集凋落物直至生长季结束(9月),每月上旬根据天气等状况进行取样,一般在1—5日之间完成。凋落物样品处理过程中,先对凋落枝、凋落叶、花果和杂质(包括无法分别的枯枝、枯叶残体)进行手工分离,清洗之后在65 °C下烘48 h,用电子天平(0.01 g)测定干物质量。气象数据从奈曼沙漠化研究综合气象观测场获取,包括月降水量、月平均气温。

### 1.3 数据处理

采用Excel 2003和SPSS 17.0软件对数据进行统计分析。采用单因素(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)进行方差分析和多重比较( $\alpha = 0.05$ ),对凋落物量和气象数据进行回归分析。利用SigmaPlot 12.5软件作图。图表中数据为平均值±标准误。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同生境植被特征

不同生境条件下物种数之间无显著差异,其他特征均存在明显差异(表1)。伴随着沙地植被恢复的过程,从流动沙丘到草地,物种数量先增加后减

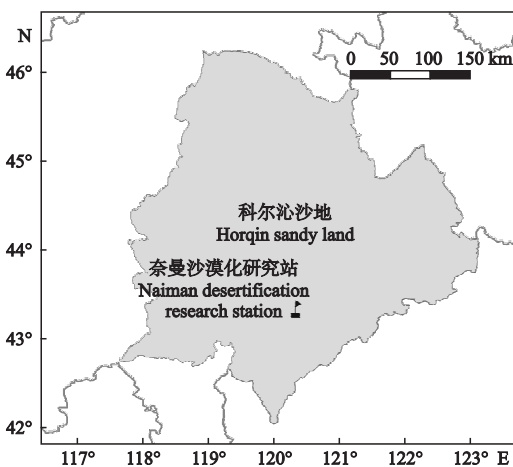


图1 研究区位置

Fig.1 Location of the study area.

表 1 不同生境植被特征

Table 1 Vegetation characteristics at different habitats (2014-08)

生境 Habitat	物种数 Species number	密度 Density (trees · hm <sup>-2</sup> )	盖度 Coverage (%)	活体生物量 Living biomass (g · m <sup>-2</sup> )	优势物种 Dominant species
GL	6.10±0.57ab	177.40±38.81a	55.5±2.8a	137.54±7.84a	猪毛蒿、白草
FD	7.00±0.47a	89.20±21.63b	43.0±4.0b	52.62±10.19b	盐蒿、小叶锦鸡
MD	5.20±0.39b	89.40±24.96b	21.6±2.2c	5.32±1.31c	沙米、狗尾草

GL: 草地 Grassland; FD: 固定沙丘 Fixed dune; MD: 流动沙丘 Mobile dune. 下同 The same below. 同列不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different letters in the same column meant significant difference at 0.05 level.

少;从流动沙丘到固定沙丘,植被密度(株或丛·m<sup>-2</sup>)无显著增加的趋势,盖度和活体生物量都显著增加;从固定沙丘向草地的恢复过程中,植被密度、盖度和活体生物量均显著增加。

## 2.2 气温和降水量变化特征

如图 2 所示,年内月平均降水量与气温表现出同步增大和减小的变化趋势,2011 年生长季(4—9 月)降水量最小(187.00 mm),2012 年生长季降水量最大(399.40 mm),2007 年 7 月和 2012 年 9 月出现 2 次明显的降水量高峰值,分别为 178.20 和 144.80 mm。每年 7 月气温最高,9 月气温骤降,年内气温变化表现出明显的季节动态。

## 2.3 凋落物总量及各组分比例年际动态

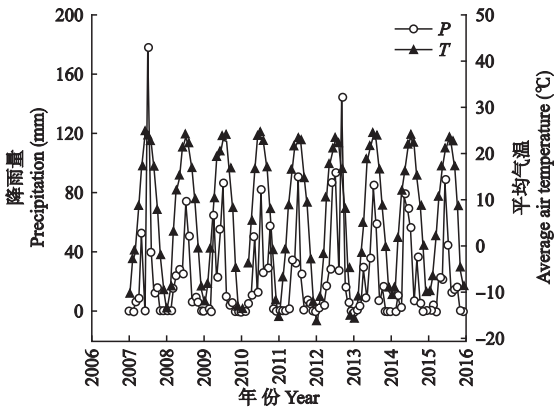
如图 3 所示,随着沙漠化逆转,不同生境植被年凋落物大小为:流动沙丘(9.01 g · m<sup>-2</sup>) < 固定沙丘(67.46 g · m<sup>-2</sup>) < 草地(119.55 g · m<sup>-2</sup>),同一年份不同生境植被的凋落物总量差异显著。不同生境植被凋落总量均在 2011 年和 2012 年分别出现高峰值和低峰值。流动沙丘凋落物总量年际动态波动明显,凋落物总量增加、减少的现象交替出现,2008 年达到最大值(18.33 g · m<sup>-2</sup>),此后开始降低,但在 2009 年开始增大并在 2011 年达到第 2 个峰值(10.61 g · m<sup>-2</sup>);固定沙丘年际变化呈“双峰”曲线,凋落物

总量最低值(46.38 g · m<sup>-2</sup>)出现在 2008 年,高峰值分别出现在 2011 年和 2014 年,但总体表现为上升趋势;草地凋落物总量年际变化呈“W”型曲线,整体变化较为平缓,2007、2011 和 2015 年出现较大值,分别为 135.05、131.62 和 130.46 g · m<sup>-2</sup>,2010 和 2012 年出现较低值,分别为 107.32 和 103.73 g · m<sup>-2</sup>。

不同生境植被中叶凋落物所占比例与凋落物总量的年际变化趋势较为一致。流动沙丘枝凋落物所占比例在 2007 年表现为最低(45.5%),此后基本呈稳定上升趋势,2015 年达到最高值(86.7%),与此相反,杂质所占比例由 2007 年的最高值(39.9%)逐年降低,在 2015 年降至最低(1.8%),流动沙丘 2012 年之后花果凋落物所占比重逐渐增大;固定沙丘的枝、杂质和叶凋落物最大值分别出现在 2008、2009 和 2014 年,花果凋落物在 2012 年达到最大,此后逐年降低,叶与杂质所占比例较大,2007 年叶所占比例达到 46.7%,2011 年杂质所占比例达到 40.0%。

## 2.4 各组分凋落物量年际动态

从图 4 可知,各组分凋落物量大小为:枝(6.28~58.29 g · m<sup>-2</sup>) > 杂质(1.28~33.60 g · m<sup>-2</sup>) > 叶(1.22~23.16 g · m<sup>-2</sup>) > 花果(0.23~4.50 g · m<sup>-2</sup>)。枝凋落物占总量 40% 以上,是凋落物的主要成分。凋落物各组分年际变化差异较大,枝凋落物的年际动态较为稳定。其中,流动沙丘和固定沙丘的枝凋落物在 2007 年最低,固定沙丘的枝凋落物变化趋势表现为“单峰”曲线,在 2010 年达到最高值(55.42 g · m<sup>-2</sup>);固定沙丘和草地的叶凋落物年际动态均表现出“W”型趋势,即叶凋落物分别在 2007、2010、2014 和 2015 年出现较大值,在 2009 和 2013 年出现较小值;花果凋落物呈“单峰”年际变化趋势,2008—2013 年总体呈上升趋势,此后略有下降,持续到 2015 年;杂质凋落物年际动态明显,其最高值出现在 2011 年。通过统计分析发现,除 2008 年花果外,相同年份不同生境植被的各组分凋落物差异显著。

图 2 研究区 2007—2015 年月平均气温( $T$ )和降雨量( $P$ )Fig. 2 Monthly average air temperature ( $T$ ) and precipitation ( $P$ ) at study area from 2007 to 2015.

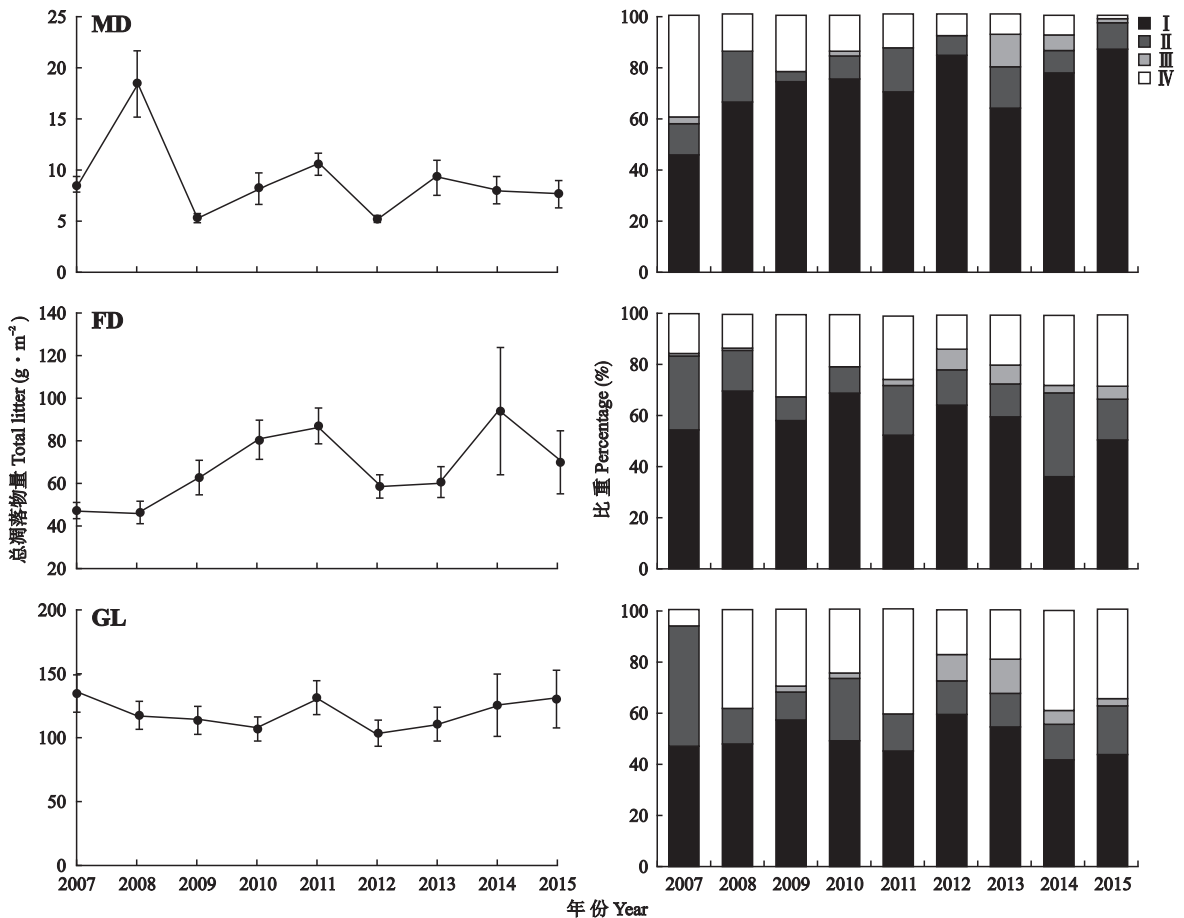


图3 不同生境凋落物总量及所占比重年际动态

Fig.3 Inter-annual dynamics in total litter production and corresponding proportion at different habitats.

GL: 草地 Grassland; FD: 固定沙丘 Fixed dune; MD: 流动沙丘 Mobile dune. I: 枝 Branch; II: 叶 Leaves; III: 花果 Flowers and fruits; IV: 杂质 Others. 下同 The same below.

## 2.5 凋落物总量年内动态

由图5所示,不同生境植被的月凋落物量(9年月平均值)生长季内变化趋势均表现为“U”型曲线,5—8月凋落物量整体处于较低水平,凋落物量高峰值均出现在4月和9月,不同生境条件下4月凋落物量占生长季内总凋落物量的比例大小为:固定沙丘(55.2%)>草地(51.3%)>流动沙丘(13.9%),9月该比例为:流动沙丘(50.0%)>草地(28.6%)>固定沙丘(25.7%).流动沙丘9月凋落物量( $26.78 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ )高于4月( $7.46 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ),固定沙丘和草地4月凋落物量( $214.02$ 和 $350.21 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ )均高于9月( $99.65$ 和 $195.43 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ).

## 2.6 各组分凋落物量生长季内动态

由图6所示,总体来看,流动沙丘各组分凋落物量年内变化幅度较小,即各组分凋落物在整个生长季内保持较低水平,4—7月基本不变,8—9月增大;草地和固定沙丘凋落物各组分含量表现出同步变化的趋势,均在4月和9月出现高峰值,5—8月整体

处于较低水平.

固定沙丘和草地的枝凋落物量在5—8月持续缓慢降低,8月急剧升高,9月达到高峰值,分别为 $54.08$ 和 $109.57 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,固定沙丘和草地9月的枝凋落物量分别占各自全年枝凋落总量的24%和48%.不同生境枝凋落物在4月、5月和9月差异显著.

与固定沙丘和草地的枝凋落物年内动态变化特征较为相似,其叶凋落物量在4—5月急剧下降,但6—8月持续增大.9月流动沙丘、固定沙丘和草地叶凋落物量高峰值分别为 $4.83$ 、 $22.90$ 和 $38.74 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ .不同生境叶凋落物在4月、7月和9月差异显著.

与其他组分凋落物年内变化特征不同,花果凋落物4月低于9月,5—7月花果凋落物基本保持不变,7月之后逐渐升高.不同生境叶凋落物在4和9月差异显著.

虽然固定沙丘和草地杂质凋落物在4—5月呈下降趋势,但下降幅度明显小于同期其他组分,这使得杂质凋落物在5月仍处于较高水平.

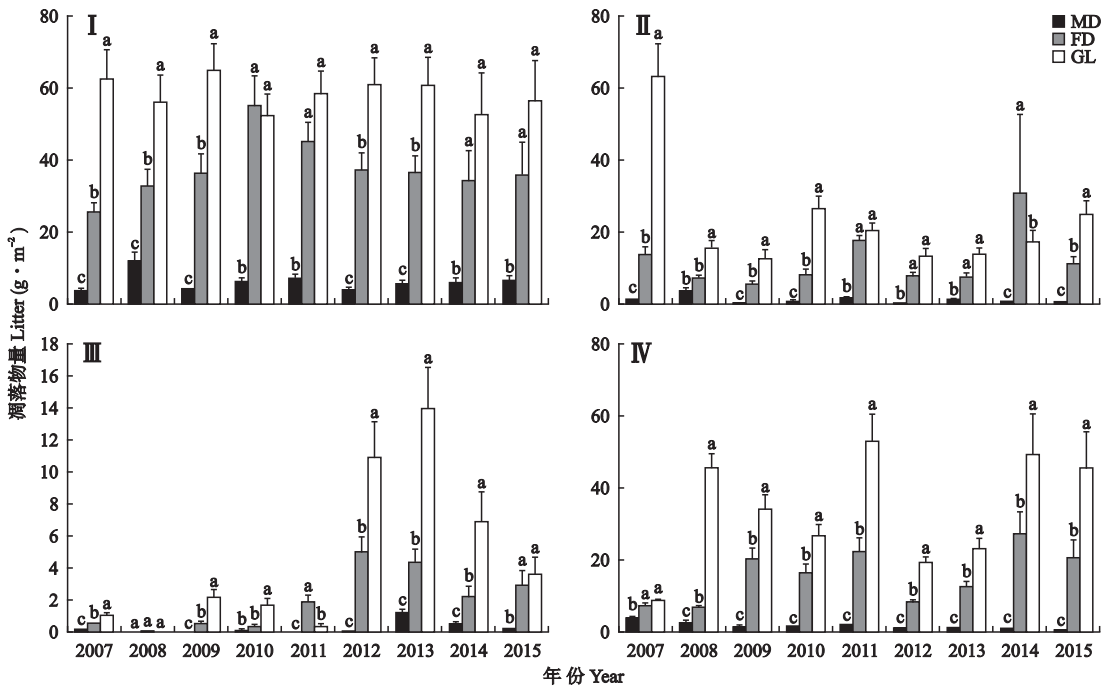


图 4 不同生境各组分凋落物年际动态

Fig.4 Inter-annual dynamics in various litter components at different habitats.

不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different letters meant significant difference at 0.05 level.

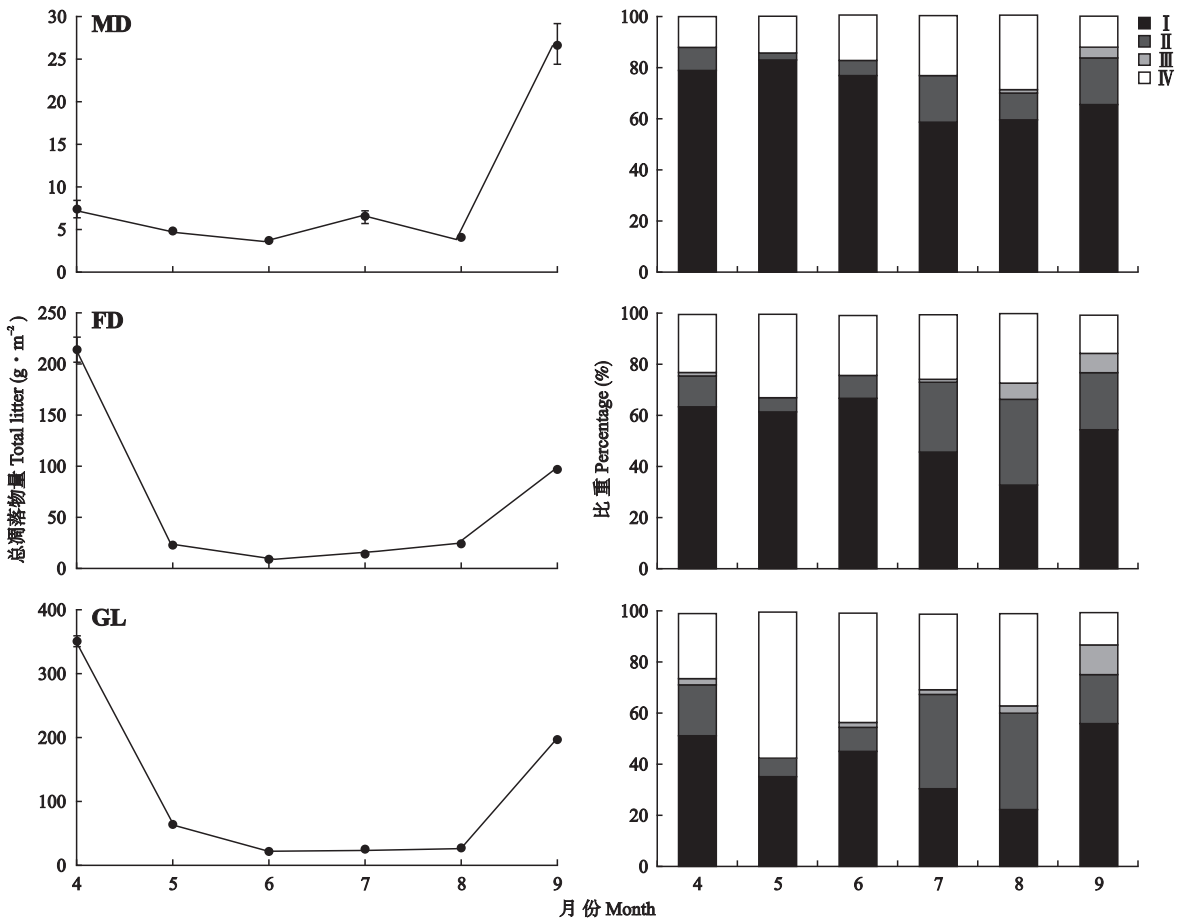


图 5 不同生境凋落物总量及所占比重年内动态

Fig.5 Intra-annual dynamics in total litter production and the corresponding proportion at different habitats.

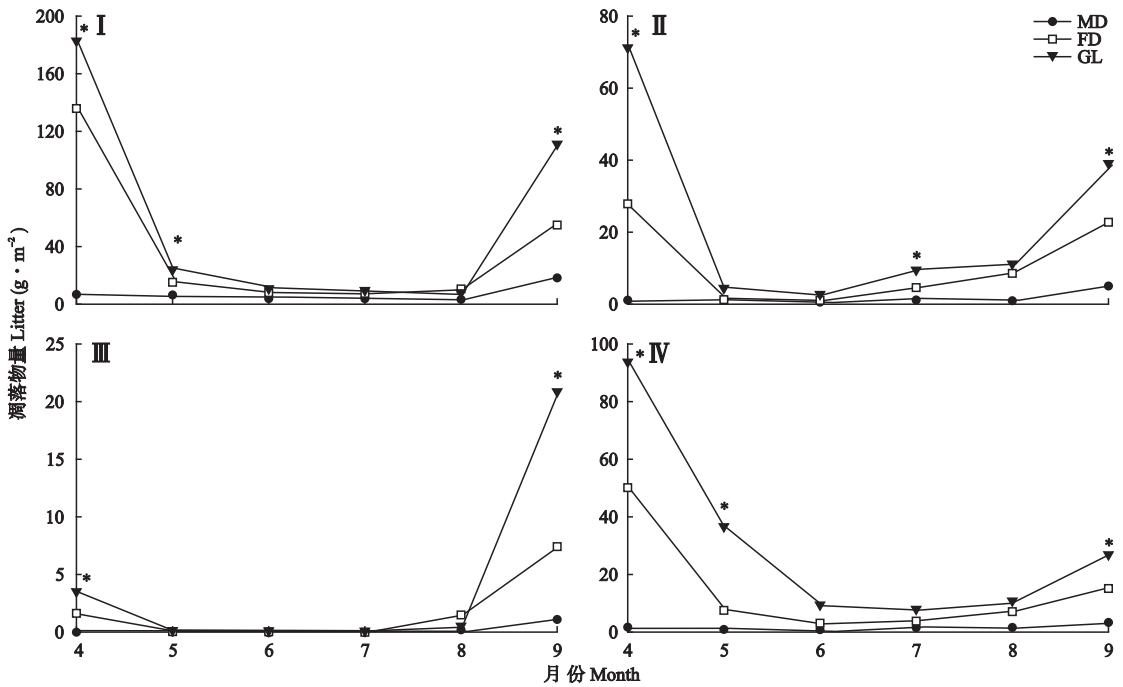


图 6 不同生境凋落物各组分年内动态

Fig.6 Intra-annual dynamics in various litter components at different habitats.

## 2.7 凋落物动态变化的驱动因子

由表 2 可以看出, 流动沙丘月凋落物量与气温和降水量不相关. 在固定沙丘和草地, 月凋落物量与月降水量和气温均呈显著负相关, 但降水量解释率较低, 分别为 10% 和 13%; 气温分别解释固定沙丘和草地凋落物量月动态变化的 60% 和 74%, 表明气温是影响固定沙丘和草地凋落物量年内动态的重要因子.

由表 3 可以看出, 2007—2015 年, 不同生境条件下年凋落物量与年均气温和年降水量之间的相关性均不显著, 表明气温和降水量并不是影响该地区凋落物量年际动态的重要因子.

表 2 不同生境条件下月凋落物量( $y$ )与月降水量和月均气温之间的回归关系

Table 2 Regressive relationship of monthly litter production ( $y$ ) with monthly precipitation and monthly mean temperature at different habitats

生境 Habitat	因子 Factor	回归方程 Regression equation	$R^2$	$P$
MD	$P$ (mm)	-	0.04	0.17
	$T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	-	0.02	0.28
FD	$P$ (mm)	$y = 98.27 - 0.76x$	0.10	<0.05
	$T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$y = 306.46 - 13.03x$	0.60	<0.01
GL	$P$ (mm)	$y = 170.28 - 1.32x$	0.13	<0.01
	$T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$y = 527.16 - 22.35x$	0.74	<0.01

$P$ : 月降水量 Monthly precipitation;  $T$ : 月均气温 Monthly mean temperature.

表 3 不同生境条件下年凋落物量( $y$ )与年降水量和年均气温的相关关系

Table 3 Correlation of annual litter production ( $y$ ) with annual precipitation and annual mean temperature at different habitats

生境 Habitat	因子 Factor	$R^2$	$P$
MD	年降水量 Annual precipitation (mm)	0.22	0.20
	年均气温 Annual mean temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	0.02	0.74
FD	年降水量 Annual precipitation (mm)	0.11	0.39
	年均气温 Annual mean temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	0.25	0.17
GL	年降水量 Annual precipitation (mm)	0.13	0.34
	年均气温 Annual mean temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	0.01	0.80

## 3 讨 论

### 3.1 凋落物年际动态变化

2012 年不同生境的凋落物总量均较低, 2011 年生长季降水量最低 (187 mm), 较低的降水量限制了当年植物生长<sup>[27]</sup>, 进而影响其凋落物量. 不同生境的凋落总量和各组凋落物量差异均显著, 随着科尔沁沙地生态系统沙漠化逆转, 不同生境植被的凋落物量具有流动沙丘 < 固定沙丘 < 草地的特征. 由于植被物种组成会影响凋落物的产生及分解<sup>[28]</sup>, 不同植被组成方式会导致各生境条件下凋落物总量及各

组分含量之间存在差异,如草本植物和灌木本身的形体差异会直接影响其凋落物的产量.一年生植物会整株转化为凋落物,而多年生物种主要通过器官脱落形成凋落物,凋落物不同的来源方式也是导致不同生境凋落物差异的重要因素.就科尔沁沙地而言,流动沙丘以一年生草本植物沙米和一年生禾本科狗尾草为优势物种;固定沙丘以差巴嘎蒿和小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)两种灌木为优势物种,同时伴生大量的一年生和多年生草本<sup>[29-30]</sup>;再结合该研究区域2014年生长季植被特征(表1),沙质草地以多年生草本猪毛蒿和白草为优势物种,因此,流动沙丘枝凋落物所占比例高于固定沙丘和沙质草地.此外,3类生境的地上生物量差异也是导致不同生境凋落物产生分异的重要原因<sup>[25]</sup>.不同生境植被盖度存在显著差异,较高盖度的植被可以抵御部分风力搬运作用,从而形成较强的凋落物截获力,这是导致草地凋落物量较高的又一重要原因.草地生境凋落物中枯叶和杂质的比例较高,这可能是由于草地生境对易受风搬运的枯叶与杂质的截获量高于枯枝所致<sup>[23]</sup>.

### 3.2 凋落物生长季内动态变化

不同生境植被的凋落总量生长季内变化趋势均表现为“U”型曲线的特征,与罗永清等<sup>[23]</sup>研究结果一致.4月出现第1次凋落物量高峰值,实际上4月凋落总量为上年10月到当年4月的凋落物累积量.虽然此阶段属于该地区植物休眠期,但由于上一年的植物器官和组织死亡后,并不会彻底分离,而是会继续附着在植物体上,随后在风、雪等气候因素的物理作用下逐渐脱离植物体,因此会在4月出现一次凋落物量高峰值<sup>[31]</sup>.此外,相对于固定沙丘和草地4月凋落物占生长季内凋落物总量的比例(55.2%和51.3%),流动沙丘同期凋落物所占比例并不高,仅为13.9%,这可能是因为不同生境的植被盖度和高度不同,对凋落物的截获能力不同.流动沙丘植被盖度和高度较低,抗风蚀能力较弱,其凋落物经风力搬运而损失的量较多,导致其4月凋落物低于同期固定沙丘和草地.6—8月,凋落物量缓慢增大,该时段内植物衰老伴随着持续增强的生长作用而增大,产生的凋落物总量稳定增长.8—9月凋落物增幅明显,在9月达到生长季内又一次凋落高峰,因为植物在进入冬季之前,需要降低养分消耗以储备越冬所需的养料,此时蒸腾作用明显降低,大批叶子自然凋落,凋落总量在该时段再一次达到高峰<sup>[32]</sup>.可见,凋落节律也是影响凋落物总量年内动态的重要因素.

凋落物现存量是凋落物输入与分解后的净累积量,通常指7—8月在特定生态系统地表保存的凋落物数量<sup>[33-34]</sup>,本研究中,流动沙丘、固定沙丘和草地凋落物现存量的平均值分别为10.67、40.68和52.15  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,均低于内蒙古草地凋落物现存量的平均值(58.78  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )<sup>[35]</sup>.本研究中,各组分凋落物量均在4和9月出现高峰值,这是由于在凋落物分解过程中,微生物是影响该过程最关键的因子之一,该研究区10月至次年4月气温较低,低温会引起微生物休眠甚至死亡,表现出相对停滞的微生物活动,凋落物分解量极少,其累积量在4月达到高峰值<sup>[36]</sup>;进入秋季后,植物为降低冬季中养分消耗会适应性产生大量的凋落物.进入夏季之后植物生长繁茂,衰老作用不明显,各组分凋落物量在5—8月较低.此外,只有叶凋落物在5—8月表现为持续上升趋势,当遇到雨水稀少、空气干燥,日照缩短等生理胁迫时,老叶中会大量合成脱落酸(ABA),在脱落酸的作用下,离层周围会形成一个自然的断裂面,导致叶片从离层处脱落,因此叶凋落物量在5—8月持续增大<sup>[37]</sup>.这也说明研究区内植物的叶对生长节律的响应更敏感.

### 3.3 凋落物动态变化的水热驱动因子

水分是干旱、半干旱地区植物生长和生存的主要限制因子<sup>[38]</sup>.本研究表明,降水量和气温与固定沙丘和草地月凋落物量呈显著负相关,而降水量和气温对流动沙丘月凋落物无显著影响.这是由于该研究区属于半干旱地区,降水量增加会促进凋落物的分解,同时气温升高也会使凋落物分解加速,从而使得凋落物量下降<sup>[39]</sup>.不同程度沙漠化生境的植被盖度不同,流动沙丘本身植被盖度较低,降水量和气温引起的植物生长差异不大.月平均气温分别能够解释固定沙丘和草地凋落物量生长季内60%和74%的变化,而月降水量对固定沙丘和草地凋落物年内动态变化解释率较低,仅为10%和13%,这可能主要是因为沙生植物能够依靠其特殊的叶片形态结构变异减少光辐射吸收,降低水分蒸腾,从而减少对水分需求量,可见在适宜降水量梯度范围内,较低降水量并不会影响沙生植物正常生长;本研究区纬度较高,该区典型的特征是年积温较低且日照不足.所以,该地区凋落物年内动态变化与温度的相关性较大,而受降水量影响较小.

## 4 结 论

随着沙地逐步恢复,科尔沁沙地凋落物总量表

现为流动沙丘<固定沙丘<沙质草地.不同生境条件下凋落物年际变化趋势不一致,凋落物各组分年际变化也存在较大差异.流动沙丘枝凋落物所占比例高于固定沙丘和草地.凋落总量年内变化趋势均表现为“U”型曲线的特征,现凋落物及各组分含量均在4月和9月出现高峰值.该地区凋落物年内动态变化与温度相关性较大,而受降水量影响较小.

科尔沁沙地不同生境的植被盖度存在显著差异,因此地表植被对凋落物的截获能力可能是导致凋落物及组分产生分异的重要原因之一,关于该方面还有待进一步研究.

#### 参考文献

- [1] Zhao J (赵吉), Shao Y-Q (邵玉琴), Kong X-H (孔祥辉). Decomposition of litters and its effects on soil biological environment in Huangfucuan Basin. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2002, **21**(6): 543-545 (in Chinese)
- [2] Yang Z-J (杨智杰), Chen G-S (陈光水), Xie J-S (谢锦升), et al. Litter fall production and carbon return in *Cunninghamia lanceolata*, *Schima superb*, and their mixed plantations. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(9): 2235-2240 (in Chinese)
- [3] Zheng Z (郑征), Li Y-R (李佑荣), Liu H-M (刘宏茂), et al. Litterfall of tropical rain forests at different altitudes, Xishuangbanna, southwest China. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2005, **29**(6): 884-893 (in Chinese)
- [4] Pandey RR, Sharma G, Tripathi SK, et al. Litterfall, litter decomposition and nutrient dynamics in a subtropical natural oak forest and managed plantation in north-eastern India. *Forest Ecology and Management*, 2007, **240**: 96-104
- [5] Hughes JW, Fahey TJ. Litterfall dynamics and ecosystem recovery during forest development. *Forest Ecology and Management*, 1994, **63**: 181-198
- [6] Lee IK, Son YW. Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on nutrient dynamics and litterfall production of *Pinus rigida* and *Larix kaempferi*. *Journal of Ecology and Field Biology*, 2006, **29**: 205-212
- [7] White BLA, Nascimento DLD, Dantas TVP, et al. Dynamics of the production and decomposition of litterfall in a Brazilian northeastern tropical forest (Serra de Itabaiana National Park, Sergipe State). *Acta Scientiarum: Biological Sciences*, 2012, **35**: 195-201
- [8] Sanches L, Valentini CMA, Biudes MS, et al. Seasonal dynamics of the litterfall production and decomposition in tropical transitional forest. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2009, **13**: 183-189
- [9] Jr JFG, Rezende RDS, Gregório RS, et al. Relationship between dynamics of litterfall and riparian plant species in a tropical stream. *Limnologia*, 2014, **44**: 40-48
- [10] Bou J, Caritat A, Vilar L. Litterfall and growth dynamics relationship with the meteorological variability in three forests in the Montseny natural park. *Folia Forestalia Polonica*, 2015, **57**: 145-159
- [11] Cui B-H (崔炳华), Jiang Y (蒋勇), Chen S-W (陈绍武), et al. Litter production and nutrient return of subalpine coniferous forest and coniferous and broad-leaved mixed forest in western Sichuan. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology* (四川林业科技), 2012, **33**(3): 16-20 (in Chinese)
- [12] Yang H-X (杨会侠), Wang S-L (汪思龙), Fan B (范冰冰), et al. Dynamics of annual litter mass and nutrient return of different age Masson pine plantations. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2010, **29**(12): 2334-2340 (in Chinese)
- [13] Li J-W (李景文), Liu C-Z (刘传照), Ren S-W (任淑文), et al. Litter dynamics and its return of nutrients in natural Birch-Korean pine forests. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica* (植物生态学与地植物学学报), 1989, **13**(1): 42-48 (in Chinese)
- [14] Wu Q-Q (武启骞), Wang C-K (王传宽), Zhang Q-Z (张全智). Inter- and intra-annual dynamics in litter production for six temperate forests. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2017, **37**(3): 760-769 (in Chinese)
- [15] Zhang C (张川), Yang W-Q (杨万勤), Yue K (岳楷), et al. Soluble nitrogen and soluble phosphorus dynamics during foliar litter decomposition in winter in alpine forest streams. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2015, **26**(6): 1601-1608 (in Chinese)
- [16] Li Y-L (李媛良), Wang S-L (汪思龙), Yan S-K (颜绍旒). Short-term effects of understory vegetation removal on nutrient cycling in litter layer of Chinese fir plantation. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(10): 2560-2566 (in Chinese)
- [17] Kan Y-C (阚雨晨), Wang F (王塋), Wang Y-T (王宇通), et al. Dynamics of plant litter of typical steppe under enclosure management in Inner Mongolia Autonomous Region. *Grassland and Turf* (草原与草坪), 2011, **31**(4): 25-29 (in Chinese)
- [18] Li Y-J (李玉洁), Song X-L (宋晓龙), Yu W-C (于雯超), et al. Advance in the influence of rest-grazing on the grassland ecosystem. *Journal of Agricultural Resources and Environment* (农业资源与环境学报), 2013, **30**(4): 62-71 (in Chinese)
- [19] Zhao HL, Yi XY, Zhou RL, et al. Wind erosion and sand accumulation effects on soil properties in Horqin Sandy Farmland, Inner Mongolia. *Catena*, 2006, **65**: 71-79
- [20] Zhou RL, Li YQ, Zhao HL, et al. Desertification effects on C and N content of sandy soils under grassland in Horqin, northern China. *Geoderma*, 2008, **145**: 370-375
- [21] Geng Y-B (耿元波), Shi J-J (史晶晶). Influencing factors of grassland litter decomposition and nutrient release and accumulation. *Progress in Geography* (地理



- 科学进展), 2012, **31**(5): 655-663 (in Chinese)
- [22] Lin GG, Mao R, Zhao L, *et al.* Litter decomposition of a pine plantation is affected by species evenness and soil nitrogen availability. *Plant and Soil*, 2013, **373**: 649-657
- [23] Luo Y-Q (罗永清), Zhao X-Y (赵学勇), Ding J-P (丁杰萍), *et al.* Dynamics of aboveground biomass and litters in different types of dunes under vegetation restoration processes in the Horqin Sandy Land. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2016, **36**(1): 78-84 (in Chinese)
- [24] Qu H (曲浩), Zhao X-Y (赵学勇), Zhao H-L (赵哈林), *et al.* Litter decomposition rates of three shrub species in Horqin Sandy Land and their relationship with key meteorological factors. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2010, **30**(4): 844-849 (in Chinese)
- [25] Li YQ, Han JJ, Wang SK, *et al.* Soil organic carbon and total nitrogen storage under different land uses in the Naiman Banner, a semiarid degraded region of northern China. *Canadian Journal of Soil Science*, 2013, **94**: 9-20
- [26] Zhao H-L (赵哈林), Zhou R-L (周瑞莲), Zhao X-Y (赵学勇), *et al.* Ground discriminance on positive and negative processes of land desertification in Horqin Sand Land. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2008, **28**(1): 8-15 (in Chinese)
- [27] Zhang X-X (张学霞), Ge Q-S (葛全胜), Zheng J-Y (郑景云). Impacts and lags of global warming on vegetation in Beijing for the last 50 years based on remotely sensed data and phenological information. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2005, **24**(2): 123-130 (in Chinese)
- [28] Xu W-D (徐文铎), Chen W (陈玮), He X-Y (何兴元), *et al.* Litterfall amount and its dynamics in urban forest of Shenyang, Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(11): 2931-2939 (in Chinese)
- [29] Zuo X-A (左小安), Zhao H-L (赵哈林), Zhao X-Y (赵学勇), *et al.* Species diversity of degraded vegetation in different age restorations in Horqin Sandy Land, Northern China. *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), 2009, **18**(4): 9-16 (in Chinese)
- [30] Zhao H-L (赵哈林). Desertification Process and Recovery Mechanism in Horqin Sandy Land. Beijing: Ocean Press, 2003 (in Chinese)
- [31] Yuan Z-Q (原作强), Li B-H (李步杭), Bai X-J (白雪娇), *et al.* Composition and seasonal dynamics of litter falls in a broad-leaved Korean pine (*Pinus koraiensis*) mixed forest in Changbai Mountains, Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(9): 2171-2178 (in Chinese)
- [32] Wang J-J (王健健), Wang Y-J (王永吉), Lai L-M (来利明), *et al.* Litter production and decomposition of different forest ecosystems and their relations to environmental factors in different climatic zones of mid and eastern China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2013, **33**(15): 4818-4825 (in Chinese)
- [33] Maguire DA. Branch mortality and potential litterfall from Douglas-fir trees in stands of varying density. *Forest Ecology and Management*, 1994, **70**: 41-53
- [34] Witkamp M. Microbial populations of leaf litter in relation to environmental conditions and decomposition. *Ecology*, 1963, **44**: 370-377
- [35] Wen D (温丁), He N-P (何念鹏). Spatial patterns of litter density and their controlling factors in forests and grasslands of China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2016, **36**(10): 2876-2884 (in Chinese)
- [36] Zhou X-Q (周晓庆). Effect of Seasonal Freezing-Thawing on Microbial Activity during Forest Litter Decomposition in Subalpine-Alpine Forest of Western Sichuan. Master Thesis. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2011 (in Chinese)
- [37] Yang H-Q (杨洪强), Jie Y-L (接玉玲). Biosynthesis of abscisic acid and its regulation in higher plants. *Plant Physiology Journal* (植物生理学报), 2001, **37**(5): 457-462 (in Chinese)
- [38] Wei H-X (魏海霞). Physiological and Ecological Changes of Sand Plant along A Precipitation Gradient in Semiarid Region. PhD Thesis. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2009 (in Chinese)
- [39] Wang X-E (王相娥), Xue L (薛立), Xie T-F (谢腾芳). A review on litter decomposition. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2009, **40**(6): 1473-1478 (in Chinese)

---

作者简介 王旭洋, 男, 1990年生, 博士研究生. 主要从事恢复生态学研究. E-mail: xuyangwang221@126.com

责任编辑 孙菊

---