

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0115

ZHANG Peng, SUN Hongru, JIA Bingrui. Research progress in the effects of snow cover change on forest litter decomposition in China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(6):1840-1847. [张鹏, 孙鸿儒, 贾丙瑞. 积雪变化对中国森林凋落物分解影响研究进展 [J]. 冰川冻土, 2021, 43(6):1840-1847.]

积雪变化对中国森林凋落物分解影响研究进展

张 鹏^{1,2}, 孙鸿儒^{1,2}, 贾丙瑞¹

(1. 中国科学院 植物研究所 植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 森林凋落物的分解对于维持生态系统物质循环和养分平衡具有重要意义,并受到不同积雪厚度下冻融格局的影响。冻融期(包括冻结过程期、完全冻结期、融化过程期)是冻土区凋落物分解的重要时期,该时期分解的凋落物量约占全年分解总量的一半。积雪减少通常会导致土壤温度降低、冻融循环次数增加,进而影响凋落物分解。通过综述近10年来积雪变化对我国森林凋落物分解影响的研究成果发现,积雪厚度减少在冻融期通常会抑制凋落物质量损失、碳元素释放和纤维素降解,生长季则起到促进作用,从全年来看多数表现为抑制作用。因此,冻融作用造成凋落物的物理破坏,对其分解的促进作用主要发生在后续生长季。积雪厚度减少在冻融期通常抑制氮元素释放,生长季和全年则无明显规律;磷元素和木质素目前研究还存在很大差异。最后,进一步阐述了积雪变化对凋落物分解影响研究存在的问题及未来研究发展方向。

关键词: 积雪; 冻融作用; 凋落物分解; 质量损失; 元素释放

中图分类号: S714; P426.63*5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)06-1840-08

0 引言

冻土,一般指温度在0℃或0℃以下,并含有冰的各种岩石和土壤,按冻结时间长短可划分为短时冻土、季节冻土和多年冻土。我国多年冻土主要分布于青藏高原、西部高山区,以及东北大、小兴安岭和松嫩平原北部,面积达 $2.15 \times 10^6 \text{ km}^2$,约占我国国土总面积24%^[1]。冻融是土层由于温度降到0℃以下和升至0℃以上而产生冻结和融化的一种物理地质作用和现象,在冻土区活动层土壤非常普遍^[2],主要发生在中、高纬度及高海拔地区。土壤冻融格局主要受区域气候和地表积雪厚度调控,在气候变化的影响下具有关键作用并发生着显著变化^[3]。近50年来,我国东北地区气温上升明显,特别是冬季增温幅度最大,达到 $0.5 \sim 0.7 \text{ }^\circ\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ^[4-5],最大季节冻结深度以 $2 \text{ cm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 的速率减少^[3],最大冻土深度以 $6 \text{ cm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 的速率减小^[6];美国东北部也表现出相似的冬季增温幅度 $[0.7 \text{ }^\circ\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}]$ ^[7],且冬季

积雪覆盖开始时间平均推迟 $1.7 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$,春季积雪融化时间平均提早 $4.7 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ^[8]。芬兰正在经历暖冬,北部季节性积雪随着冬季降雪的减少而变薄^[9]。过去一个世纪,全球多数地区雪盖减少,20世纪80年代以后尤为明显,减小速率高达每年5%^[10]。冬季温度和积雪的变化必将会对土壤冻融格局及凋落物分解产生显著影响。

凋落物分解是碳和养分元素从植被转移到土壤的主要生物途径,是植被-凋落物-土壤养分循环和生物地球化学循环的重要枢纽。在维持森林生态系统生产力、土壤有机质的形成、养分供应、群落演替等方面具有不可替代的作用和地位^[11],是生态学、土壤学和生物地球化学等领域的热点研究内容。冻融期间凋落物的分解可为生长季植物生长提供必要的养分,对于维持生态系统物质循环和养分平衡具有重要作用^[12-13]。冻融循环会造成凋落物的物理损伤和化学变化,利于分解者与凋落物接

收稿日期: 2021-05-07; 修订日期: 2021-08-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFA06006103); 国家自然科学基金项目(32071592)资助

作者简介: 张鹏, 硕士研究生, 主要从事冻融变化与森林生态系统碳排放研究. E-mail: zhangpeng@ibcas.ac.cn

通信作者: 贾丙瑞, 副研究员, 主要从事森林生态系统碳循环研究. E-mail: jiabingrui@ibcas.ac.cn

触,增加凋落物的可分解性^[14]。但频繁的冻融交替会导致微生物数量和酶活性降低,进而减缓凋落物分解速率^[11]。野外自然条件下冻融环境具有很大不确定性,冻融频率和强度波动较大,因此深入理解冻融作用下凋落物分解过程是未来凋落物研究的重点^[15],有助于明确冻土区土壤肥力及生物地球化学循环过程^[2]。

进入21世纪以来,我国在气候变化对凋落物分解影响方面的报道逐年增多,正受到越来越多的关注,有关冻融作用的影响研究尚处于起步阶段,是未来凋落物生态研究的重点^[16]。国外有关积雪变化对森林凋落物分解影响的研究较少^[17]。笔者综述了近10年来积雪变化对我国森林凋落物分解过程中质量损失、元素释放、纤维素与木质素降解的影响,为全面认识气候变化下冻土区碳循环和养分循环过程提供理论支持与借鉴。

1 积雪变化对冻融作用的调控

目前积雪变化对森林凋落物分解影响的研究通常采用野外试验控制积雪厚度,即林窗-林下自然积雪梯度^[18-24]或人工控制积雪厚度^[25-28]。从林窗到林下自然形成的积雪梯度或人工增雪、除雪处理控制积雪厚度,导致不同的冻结强度、冻融循环次数发生。已有研究表明,积雪去除使冻融期表层土壤平均温度降低0.4℃^[29]、1.1℃^[30]、2.4℃^[25,27];积雪去除使冻融期表层土壤最低温度降低幅度更大,达到7℃以上^[30-31]。同时,积雪减少或去除通常会导致表层土壤冻融循环次数增加17%^[25,27-28,32]、18%^[26,28-29]、20%^[26]、27%^[29],甚至达到143%^[31]、163%^[30]。不同的研究地点差异比较大,可能与当地气候、积雪控制、冻融循环次数计算方法等有关。

2 积雪变化对凋落物分解过程的影响

2.1 积雪变化对凋落物质量损失的影响

一般按冻融过程将冻融期划分为冻结过程期(freezing stage)、完全冻结期(deep freezing stage)和融化过程期(thawing stage)。冻融期凋落物分解是冻土区重要的生态系统过程之一^[33]。一个季节性冻融期凋落物分解量占第一年分解总量的40%~55%^[22,24,28,34-36]、64%~66%^[33,37-38],充分说明这个阶段是冻土区凋落物分解的重要时期。

表1列出了积雪变化对凋落物分解影响的研究结果。从中可以看出,冻融期积雪厚度减少会抑制

凋落叶分解,而凋落枝则无明显规律。邓仁菊^[37]通过对比生长季(4月—10月)和冻融期(10月—次年4月)也发现,经历冻融过程的凋落物分解明显降低。积雪厚度减少使得冻融循环发生频次增加,Taylor等^[14]认为,频繁冻融会直接杀死大部分不耐寒微生物,不利于微生物丰富度和多样性的维持,进而抑制凋落物的分解。一次完整的冻融循环过程将减少50%以上的微生物生物量^[39]。Walker等^[40]对加拿大卡尔加里西北部表土培养发现,经过48个冻融循环后,微生物种群的复杂性和生存能力显著降低。积雪去除使瑞典北部混交针叶林土壤中弹尾目和蛴螬亚纲数量分别降低了99%和88%^[17],从而减少了凋落物被土壤动物取食的机会。

积雪变化还可能对后续凋落物在生长季的分解动态产生影响,除部分无变化或无明显规律外,多数研究均表明积雪厚度减少会促进生长季凋落物的分解(表1)。厚型积雪覆盖促进了冻融期凋落物的分解,而无积雪覆盖促进了生长季凋落物的分解。前者积雪有效保护了解析者以及融化期强烈的淋溶作用使凋落物中可溶性物质通过雪水的冲刷作用而被淋洗掉;后者冬季无积雪覆盖具有更为频繁的冻融循环,破坏凋落物的物理结构,提高了其易分解程度^[18,41]。

从全年分解来看,大多研究表明凋落物分解率随积雪厚度的减小而降低,红桦则无明显差异(表1)。经过两年的分解,两种灌木凋落叶分解率林下相比林窗降低约20%^[21]。也有研究发现,综合两年观测,除雪处理使红松和蒙古栎分解率分别降低0.3%和2.7%^[26]。不同质量凋落物对积雪厚度的响应存在差异,随着观测时间延长第二年仅针叶凋落物岷江冷杉和四川红杉有显著差异,可能与其分解慢、残存易分解组分相对丰富有关,因而受冻融等环境影响更为持久^[18]。

2.2 积雪变化对凋落物元素释放的影响

凋落物作为养分元素的基本载体,其分解过程中养分的归还对于陆地生态系统生产力的高低起着关键作用,其中研究碳(C)、氮(N)、磷(P)等元素的释放对于全面认识生态系统碳和养分循环具有重要意义。凋落物分解过程中C元素均表现为释放,与质量损失规律相同,积雪厚度减少在冻融期抑制C元素释放,生长季则促进C元素释放(表2)。室内模拟冻融处理下CO₂排放速率低于对照^[43],野外积雪去除使得CO₂排放减少47%^[17]。Wu^[27]则发

表1 积雪变化对凋落物质量损失的影响

Table 1 Effects of snow cover changes on litter mass loss

地点	研究方法	研究对象	冻融期	生长季	全年	文献来源
四川川西高原	1	窄叶鲜卑花叶	—			[42]
黑龙江帽儿山	1	水曲柳叶	—	+	—	[25]
		兴安落叶松叶	—	+	—	
黑龙江帽儿山	1	红松叶	—	+	—	[26,28]
		蒙古栎叶	—	+	—	
四川毕棚沟自然保护区	2	岷江冷杉叶	—		—	[18]
		四川红杉叶	—		—	
		方枝柏叶	—		O	
		红桦叶	—		O	
四川毕棚沟自然保护区	2	红桦叶	—			[32]
		岷江冷杉叶	—			
		方枝柏叶	—			
		四川红杉叶	—			
		康定柳叶	—			
		高山杜鹃叶	—			
四川毕棚沟自然保护区	2	康定柳叶	—	O		[20]
		四川红杉叶	—	+		
		岷江冷杉叶	—	+		
		高山杜鹃叶	—	+		
		红桦叶	—	+		
		方枝柏叶	—	O		
四川米亚罗自然保护区	2	华西箭竹叶	—	O	—	[29]
		康定柳叶	—	O	—	
四川米亚罗自然保护区	2	方枝柏叶	—	O	—	[29]
		岷江冷杉叶	—	+	O	
		四川红杉叶	—	+	+	
		红桦叶	—	+	O	
新疆天山	2	雪岭云杉叶	—		—	[35]
新疆天山	2	雪岭云杉叶	—		—	[22]
四川米亚罗自然保护区	2	岷江冷杉枝	O		—	[23]
新疆天山	2	雪岭云杉叶	—		—	[24]

注：—为积雪厚度减少凋落物质量损失减小，+为增加；O为无变化或无明显规律；1为人工控雪研究方法；2为林窗-林下积雪梯度研究方法。下同。

现生长季不同阶段C元素释放速率各不相同,红松生长季初期和末期表现为抑制,中期表现为促进;蒙古栎则相反,生长季初期和末期表现为促进,中期为抑制。从全年来看,积雪厚度减小对凋落物C释放起到抑制作用(表2),冻融循环对土壤C释放也表现出相似的作用^[44]。

从表2可以看出,在冻融期,积雪厚度减少通常抑制N元素释放,只有兴安落叶松叶表现为抑制富集^[25],雪岭云杉叶表现为促进释放^[24]。与生长季相比,经历冻融期的凋落物N元素释放也明显降低^[37]。冻融期积雪厚度减小对N元素释放的抑制

主要发生在冻结过程期和融化过程期^[27]。从生长季和全年来看,积雪厚度减少,N元素表现为释放或富集均有报道,并没有明显规律(表2)。大多数研究表明,凋落物分解过程中P元素表现为释放,冻融期积雪厚度减少起抑制作用或无明显规律,生长季和全年则表现各异,从抑制、促进到无明显规律均有报道(表2)。经历冻融期的凋落物P元素释放明显低于对照生长季^[37]。武启骞等^[19]则发现冻融期4种凋落物P释放率均以中积雪覆盖下最高,生长季没有明显的规律性。另外也有研究表明,积雪厚度减小冻融期促进P元素富集,生长季初期和中期抑

表2 积雪变化对凋落物元素释放的影响

Table 2 Effects of snow cover changes on element release during litter decomposition

地点	研究方法	研究对象	C 元素			N 元素			P 元素			文献来源
			冻融期	生长季	全年	冻融期	生长季	全年	冻融期	生长季	全年	
黑龙江帽儿山	1	水曲柳叶	R-	R+	R-	R-	RO	R+	R-	R+	R-	[25]
		兴安落叶松叶	R-	R+	R-	E-	EO	EO	R-	RO	R-	
黑龙江帽儿山	1	红松叶	R-	R+	R-	R-	R+	R-	E+	R+	R-	[27]
		蒙古栎叶	R-	R+	R-	R-	R+	RO	E+	R+	R-	
四川毕棚沟自然保护区	2	岷江冷杉叶	R-	R+		R-	R+		R-	R-		[18]
		四川红杉叶	R-	R+		R-	R+		RO	RO		
		方枝柏叶	R-	R+		R-	R+		R-	R+		
		红桦叶	R-	R+		R-	R+		RO	RO		
四川毕棚沟自然保护区	2	康定柳叶					R-	EO		RO	R-	[20]
		四川红杉叶					RO	EO		RO	R-	
		岷江冷杉叶					R+	E-		R+	RO	
		高山杜鹃叶					EO	EO		R-	R-	
		红桦叶					EO	EO		E-	R+	
		方枝柏叶					RO	EO		RO	RO	
四川米亚罗自然保护区	2	华西箭竹叶	R-	R+	R-	R-	E+	R-	R-	R-	R-	[21]
		康定柳叶	R-	R+	R-	R-	E+	E+	R-	R-	R-	
新疆天山	2	雪岭云杉叶	R-		R-	R+		R+	RO		RO	[24]

注：R 为释放，E 为富集，下同。

制 P 元素释放,生长季末期才促进 P 元素释放^[27],而由此引起的 P 元素释放动态改变不利于植物养分利用。凋落物养分元素释放进程改变会直接影响植被生长,目前研究还存在很大的差异,特别是积雪变化对后续生长季养分元素释放的影响,未来这方面的研究有待进一步加强。

2.3 积雪变化对纤维素和木质素降解的影响

木质素和纤维素作为凋落物最难分解的成分,

其降解过程也是维持自然界碳平衡的重要过程^[45]。表3列出了积雪变化对凋落物纤维素和木质素降解影响的研究结果。从中可以看出,积雪厚度减少通常会抑制冻融期、促进生长季的纤维素降解,说明冻融作用造成的凋落物物理破坏只有到后续生长季才对其分解起到促进作用。从全年来看,多数表现为抑制纤维素降解(表3),只有方枝柏叶和四川红杉叶表现为促进降解^[29]。木质素是由苯丙烷单

表3 积雪变化对凋落物纤维素和木质素降解的影响

Table 3 Effects of snow cover changes on cellulose and lignin degradation in litter

地点	研究方法	研究对象	纤维素			木质素			文献来源
			冻融期	生长季	全年	冻融期	生长季	全年	
黑龙江帽儿山	1	水曲柳叶	R-	R+	R-	R-	R+	R-	[25]
		兴安落叶松叶	R-	R-	R-	R+	RO	R-	
四川毕棚沟自然保护区	2	岷江冷杉叶	R-	R+		RO	RO		[18]
		四川红杉叶	R-	R+		RO	RO		
		方枝柏叶	R-	R+		R-	RO		
		红桦叶	RO	R+		RO	RO		
四川米亚罗自然保护区	2	华西箭竹叶	R-	R+	R-	R-	RO	R-	[21]
		康定柳叶	R-	R+	R-	R-	R-	R-	
四川米亚罗自然保护区	2	方枝柏叶	R-	R+	R+	EO	R-	E+	[29]
		岷江冷杉叶	R-	EO	RO	EO	EO	EO	
		四川红杉叶	R-	R+	R+	E-	E+	E-	
		红桦叶	R-	EO	R-	R+	E+	RO	
新疆天山	2	雪岭云杉叶			R-	E-		E-	[24]

元组成的结构稳定的天然高分子材料,较纤维素结构复杂且更难以分解,显著影响着凋落物的分解过程^[24]。木质素降解率是衡量凋落物分解速率的一个主要指标^[46],目前的研究结果差异还比较大(表3),积雪减少通常抑制木质素降解或影响不明显,也有少数研究表现为富集。可能因为凋落物分解过程中,微生物形成了类似木质素的耐酸化合物积累,进而导致“木质素”增加,一般发生在初始木质素浓度相对较低时(<30%)^[29,47]。

3 存在的问题及展望

3.1 基于区域差异开展针对性研究

Wang等^[48]利用中国636个气象站点资料对土壤冻融时间变化研究发现,中国东西部相差较大,东部主要受纬度影响,而西部主要受海拔影响。青藏高原和西北部雪量呈增加趋势,而在东北部则呈微弱减少趋势^[49]。未来应围绕各冻土区的积雪和冻融变化特征开展研究,特别是积雪减少对于冬季凋落物分解的抑制^[20,22,24-26,28-29,32],使得春季防火期地表可燃物载量增加,同时也不利于可燃物保湿,对于林火高发和火灾危害严重的大、小兴安岭林区应引起足够重视。目前积雪变化对凋落物分解影响的研究多见于我国西部的高山、亚高山生态系统,以及黑龙江帽儿山(见表1~表3),对于东北大、小兴安岭林区则缺乏研究^[26,50],而季节性积雪格局变化在高纬度地区尤为明显^[51]。因此,未来应加强这些区域的研究。

3.2 注重长期研究,增加冻融期观测频率

目前有关积雪厚度变化对凋落物分解研究的观测时长多数为一年^[22,24-25,27,29,35]或两年^[18-21,23,26],还有研究主要关注冻融期,只进行了半年观测^[20,42,52]。未来应注重长期研究,特别是分解缓慢的物种,深入理解冻融作用对于后期难分解组分的影响。同时,积雪厚度减少在冻融期通常会抑制N、P元素释放,生长季则表现各异,而生长季养分释放与植物生长密切相关,未来应加强这方面的研究。野外试验通常在秋末10月中下旬开始放置凋落物分解袋,分别在冻结过程期(12月)、完全冻结期(2—3月)、融化过程期(4月),以及生长季早期(6月)、中期(8月)、末期(10—11月)各取样1次。未来应增加观测频率,特别是冻融变化频繁的冻结过程期和融化过程期,二者是凋落物分解的两个关键时段。前者处于新鲜凋落物刚开始的快速分解阶段^[53],后者积雪

融化淋溶作用强烈^[26],且不同元素可溶性差异显著^[54]。

3.3 综合考虑生物与非生物因素,加强积雪变化与凋落物分解的机理研究

冻融作用是积雪变化调控凋落物分解的重要因素,目前主要考虑冻融循环次数、冻结强度等,除此之外还有冻融速率、冻融幅度、冻融时长、完全冻结期间温度等其他冻融特征要素,同时缺少通过室内冻融控制试验分析其调控机理的研究。另外,野外积雪厚度控制多取决于自然降雪,不同研究的冻融要素水平不一致,使得各研究结果直接对比分析的难度很大。季节性冻融期间土壤动物对凋落物分解具有明显的贡献^[12],积雪去除会改变土壤微生物量和酶活性^[55-56],加强分解者的研究才能更深入地探讨其内部调控机制。冻融作用不仅直接影响冻融期养分元素释放以及纤维素和木质素的降解,还会延续到其后生长季,目前研究结果差异较大,生长季其他因素可能也会产生重要作用,例如林窗-林下积雪梯度试验中光照、温度、水分状况等都会发生较大变化。因此,通过野外试验研究积雪变化对凋落物分解影响时,应严格控制其他因素可能造成的混淆。另外,自然界中凋落物通常是以混合物的形式存在,已有研究发现,超过60%的混合凋落物对其分解速率的影响存在正向或负向效应^[57-58],寒冷气候区通常表现为负向效应^[59]。而目前研究多以单一凋落叶作为实验对象(见表1~表3),很少考虑混合效应,为了准确理解凋落物的分解过程,加强冻融作用下混合凋落物分解的研究更具有现实意义。同时,冻融作用对地下根系凋落物分解过程的研究也是不容忽视的一个部分。

凋落物分解是一个长期的过程,受多种因素影响,分解过程较为复杂,仅凭短期实验难以深入揭示机理,模型是较为理想的研究方法之一^[60]。未来应在典型站点长期观测积雪、土壤温度、水分、凋落物分解,以及相伴随的养分元素和微生物等动态变化,计算冻融特征参数,弄清积雪变化对凋落物分解、养分释放的生物、物理调控机制,建立数学模型。另外,凋落物养分释放、富集与其载体土壤密切相关,未来应加强两者养分循环特征及其相互作用关系的研究。

4 结论

通过积雪变化对我国森林凋落物分解影响综

述可知,积雪厚度减少在冻融期通常会抑制凋落物质量损失、碳和氮元素释放及纤维素降解,生长季则起到促进作用(其中氮元素无明显规律);而磷元素和木质素目前研究还存在很大差异。未来研究应加强以下方面:一是基于积雪和冻融特征开展针对性研究,积雪减少对于冬季凋落物分解的抑制,使得地表可燃物大量积累,对于林火高发和火灾危害严重的大、小兴安岭林区应引起高度重视;二是注重长期研究,特别是积雪变化对后续生长季养分释放的影响研究,增加冻融期观测频率;三是综合考虑生物与非生物因素,加强积雪变化与凋落物分解的机理研究和模型模拟,进而为全面认识气候变化下冻土区碳循环和养分循环过程提供理论支持与借鉴。

参考文献(References):

- [1] Zhou Youwu, Guo Dongxin, Qiu Guoqing, et al. Geocryology in China[M]. Beijing: Science Press, 2000. [周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000.]
- [2] Wang Jiaoyue, Song Changchun, Wang Xianwei, et al. Progress in the study of effect of freeze-thaw processes on the organic carbon pool and microorganisms in soils[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(2): 442-452. [王娇月, 宋长春, 王宪伟, 等. 冻融作用对土壤有机碳库及微生物的影响研究进展[J]. 冰川冻土, 2011, 33(2): 442-452.]
- [3] Li Yuxing. Response of changes in soil freeze/thaw state to climate change in Northeast China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019. [李宇星. 中国东北地区土壤冻融对气候变化的响应[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.]
- [4] Wang Yu, Zhou Guangsheng, Jia Bingrui, et al. Climate change characteristics in Chinese boreal forest region from 1954 to 2005 [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(5): 942-948. [王宇, 周广胜, 贾丙瑞, 等. 1954—2005年中国北方针叶林分布区的气候变化特征[J]. 应用生态学报, 2008, 19(5): 942-948.]
- [5] He Wei, Bu Rencang, Xiong Zaiping, et al. Characteristics of temperature and precipitation in Northeastern China from 1961 to 2005 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 519-531. [贺伟, 布仁仓, 熊在平, 等. 1961—2005年东北地区气温和降水变化趋势[J]. 生态学报, 2013, 33(2): 519-531.]
- [6] Zhou Xiaoyu, Zhao Chunyu, Li Na, et al. Influence of snow and temperature on the depth of frozen soil in winter half year in Northeast China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(1): 1-13. [周晓宇, 赵春雨, 李娜, 等. 东北地区冬半年积雪与气温对冻土的影响[J]. 冰川冻土, 2021, 43(1): 1-13.]
- [7] Hayhoe K, Wake C P, Huntington T G, et al. Past and future changes in climate and hydrological indicators in the US North-east[J]. Climate Dynamics, 2007, 28: 381-407.
- [8] Hamburg S P, Vadeboncoeur M A, Richardson A D, et al. Climate change at the ecosystem scale: a 50-year record in New Hampshire[J]. Climatic Change, 2013, 116: 457-477.
- [9] Venäläinen A, Tuomenvirta H, Heikinheimo M, et al. Impact of climate change on soil frost under snow cover in a forested landscape[J]. Climate Research, 2001, 17: 63-72.
- [10] Fang Jingyun, Zhu Jiangling, Wang Shaopeng, et al. Global warming, human-induced carbon emissions, and their uncertainties [J]. Science China: Earth Sciences, 2011, 41(10): 1385-1395. [方精云, 朱江玲, 王少鹏, 等. 全球变暖、碳排放及不确定性[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(10): 1385-1395.]
- [11] Huang Jinxue, Huang Limei, Lin Zhichao, et al. Controlling factors of litter decomposition rate in China's forests[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2010, 5: 56-63. [黄锦学, 黄李梅, 林智超, 等. 中国森林凋落物分解速率影响因素分析[J]. 亚热带资源与环境学报, 2010, 5: 56-63.]
- [12] Peng Yan, Yang Wanqin, Xue Qiao, et al. Contribution of soil fauna to the decomposition of foliar litter of two alpine meadow plants during the season with freeze-thaw cycles[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(19): 6149-6158. [彭艳, 杨万勤, 薛樵, 等. 季节性冻融期间土壤动物对高山草甸两种凋落叶失重的贡献[J]. 生态学报, 2016, 36(19): 6149-6158.]
- [13] Ruhland C T, Remund A J, Tiry C M, et al. Litter decomposition of three lignin-deficient mutants of Sorghum bicolor during spring thaw[J]. Acta Oecologica, 2018, 91: 16-21.
- [14] Taylor B R, Parkinson D. Does repeated freezing and thawing accelerate decay of leaf litter? [J] Soil Biology & Biochemistry, 1988, 20: 657-665.
- [15] Gao Jia, Wei Xinyu, Chen Ya, et al. Litter decomposition rates and organic carbon dynamics in subalpine forest during freeze-thaw cycles[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(9): 3734-3743. [高嘉, 卫芯宇, 谌亚, 等. 模拟冻融环境下亚高山森林凋落物分解速率及有机碳动态[J]. 生态学报, 2021, 41(9): 3734-3743.]
- [16] Jia Bingrui. Litter decomposition and its underlying mechanisms[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2019, 43(8): 648-657. [贾丙瑞. 凋落物分解及其影响机制[J]. 植物生态学报, 2019, 43(8): 648-657.]
- [17] Bokhorst S, Metcalfe D B, Wardle D A. Reduction in snow cover negatively affects decomposers but impact on decomposition rates is substrate dependent[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2013, 62: 157-164.
- [18] Wu Qiqian. Effects of snow patches on litter decomposition in the alpine forest[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2013. [武启骞. 高山森林积雪斑块对凋落物分解的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2013.]
- [19] Wu Qiqian, Wu Fuzhong, Yang Wanqin, et al. Effect of snow cover on phosphorus release from leaf litter in the alpine forest in eastern Qinghai-Tibet plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(12): 4115-4127. [武启骞, 吴福忠, 杨万勤, 等. 冬季积雪对青藏高原东缘高海拔森林凋落叶P元素释放的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(12): 4115-4127.]
- [20] He Jie. Effects of forest gap locations in an alpine forest on element release during foliar litter decomposition [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2015. [何洁. 高山森林林窗位置对凋落物分解过程中元素释放的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2015.]
- [21] He Wei. Effects of forest gap locations on the decomposition of two shrub foliar litter species in the alpine forest of western Sichuan [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2016. [何伟. 川西高山森林林窗位置对两种灌木凋落叶分解的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2016.]
- [22] Chen Wenjing, Gong Lu, Liu Yutong. Effects of seasonal snow cover on decomposition and carbon, nitrogen and phosphorus release of Picea schrenkiana leaf litter in Mt. Tianshan,

- Northwest China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2018, 42(4): 487-497. [陈文静, 贡璐, 刘雨桐. 季节性积雪对天山雪岭云杉凋落叶分解和碳氮磷释放的影响[J]. 植物生态学报, 2018, 42(4): 487-497.]
- [23] Guo Caihong, Yang Wanqin, Wu Fuzhong, et al. Effects of forest gap size on initial decomposition of twig litter in the subalpine forest of western Sichuan, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2018, 42(1): 28-37. [郭彩虹, 杨万勤, 吴福忠, 等. 川西亚高山森林林窗对凋落枝早期分解的影响[J]. 植物生态学报, 2018, 42(1): 28-37.]
- [24] Chen Xin. Relationship between litter decomposition and soil microbes of Schrenk spruce forest under seasonal snowfall in Tianshan Mountains, Xinjiang[D]. Urumchi: Xinjiang University, 2019. [陈新. 季节性积雪下新疆天山雪岭云杉林凋落物分解与土壤微生物的关系[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2019.]
- [25] Dou Jia. Effects of snow cover manipulation on foliar litter decomposition and nutrient release of *Fraxinus mandshurica* and *Larix gmelinii* [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2018. [窦佳. 控雪对水曲柳和兴安落叶松凋落叶分解及养分释放的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2018.]
- [26] Wu Qiqian, Wang Chuankuan. Dynamics in foliar litter decomposition for *Pinus koraiensis* and *Quercus mongolica* in a snow cover manipulation experiment [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2018, 42: 153-163. [武启骞, 王传宽. 控雪处理下红松和蒙古栎凋落叶分解动态[J]. 植物生态学报, 2018, 42: 153-163.]
- [27] Wu Q Q. Effects of snow cover manipulation on the releases of carbon, nitrogen and phosphorus from the foliar litter of two temperate tree species [J]. Science of the Total Environment, 2018, 643: 1357-1365.
- [28] Wu Q Q. Short- and long-term effects of snow cover on Korean pine and Mongolian oak litter decomposition in northeastern China[J]. Ecosystems, 2020, 23: 662-674.
- [29] Li H, Wu F Z, Yang W Q, et al. Effects of Forest Gaps on Litter lignin and cellulose dynamics vary seasonally in an alpine forest[J]. Forests, 2016, 7: 27, DOI: 10.3390/f7020027.
- [30] Li Zhijie. Effects of snow removal on soil nitrogen dynamics in subalpine coniferous forest in western Sichuan[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2018. [李志杰. 积雪去除对川西亚高山云杉林冬季土壤氮动态的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2018.]
- [31] Sarady M, Sahlin E A U. The influence of snow cover on ground freeze-thaw frequency, intensity, and duration: An experimental study conducted in coastal northern Sweden [J]. Norsk Geografisk Tidsskrift-Norwegian Journal of Geography, 2016, 70: 82-94.
- [32] Ni X Y, Yang W Q, Li H, et al. The responses of early foliar litter humification to reduced snow cover during winter in an alpine forest[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2014, 94: 453-461.
- [33] Deng Renju, Yang Wanqin, Feng Ruifang, et al. Mass loss and element release of litter in the subalpine forest over one freeze-thaw season[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(10): 5730-5735. [邓仁菊, 杨万勤, 冯瑞芳, 等. 季节性冻融期间亚高山森林凋落物的质量损失及元素释放[J]. 生态学报, 2009, 29(10): 5730-5735.]
- [34] He Wei, Wu Fuzhong, Yang Wanqin, et al. Effect of snow patches on leaf litter mass loss of two shrubs in an alpine forest [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2013, 37: 306-316. [何伟, 吴福忠, 杨万勤, 等. 积雪斑块对高山森林两种灌木凋落叶质量损失的影响[J]. 植物生态学报, 2013, 37: 306-316.]
- [35] Liu Yutong. Effect of seasonal snow cover on litter decomposition of Schrenk Spruce in Tianshan[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2017. [刘雨桐. 季节性积雪斑块对天山雪岭云杉凋落物分解的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2017.]
- [36] Wu F Z, Yang W Q, Zhang J, et al. Fine root decomposition in two subalpine forests during the freeze-thaw season[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2010, 40: 298-307.
- [37] Deng Renju. Effects of seasonal freeze-thaw on litter decomposition in the subalpine forest[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2008. [邓仁菊. 季节性冻融对亚高山森林凋落物分解的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2008.]
- [38] Wu F Z, Yang W Q, Zhang J, et al. Litter decomposition in two subalpine forests during the freeze-thaw season[J]. Acta Oecologica, 2010, 36: 135-140.
- [39] Pesaro M, Widmer F, Nicollier G, et al. Effects of freeze-thaw stress during soil storage on microbial communities and methidathion degradation [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2003, 35: 1049-1061.
- [40] Walker V K, Palmer G R, Voordouw G. Freeze-thaw tolerance and clues to the winter survival of a soil community [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2006, 72: 1784-1792.
- [41] Schmidt S K, Lipson D A. Microbial growth under the snow: Implications for nutrient and allelochemical availability in temperate soils[J]. Plant and Soil, 2004, 259: 1-7.
- [42] Hu Xia, Wu Ning, Wu Yan, et al. Effects of snow cover on the decomposition and nutrient dynamics of *Sibiraea angustata* leaf litter in western Sichuan plateau, Southwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(5): 1226-1232. [胡霞, 吴宁, 吴彦, 等. 川西高原季节性积雪覆盖对窄叶鲜卑花凋落物分解和养分动态的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(5): 1226-1232.]
- [43] Zhou Yongbin, Jia Guojing, Zhou Wangming, et al. Study on decomposition dynamics of carbon of Changbai Mountain litter [J]. Northern Horticulture, 2012, 11: 32-34. [周永斌, 贾国晶, 周旺明, 等. 长白山枯落物碳分解动态研究[J]. 北方园艺, 2012, 11: 32-34.]
- [44] Matzner E, Borken W. Do freeze-thaw events enhance C and N losses from soils of different ecosystems? A review[J]. European Journal of Soil Science, 2008, 59(2): 274-284.
- [45] Thevenot M, Dignac M F, Rumpel C. Fate of lignins in soils: A review [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2010, 42(8): 1200-1211.
- [46] Zhou Cunyu. Litter's Roles in forest ecosystem and its research progress[J]. Journal of Hubei Agricultural College, 2003, 2: 140-145. [周存宇. 凋落物在森林生态系统中的作用及其研究进展[J]. 湖北农学院学报, 2003, 2: 140-145.]
- [47] Brandt L A, King J Y, Hobbie S E, et al. The role of photo-degradation in surface litter decomposition across a grassland ecosystem precipitation gradient [J]. Ecosystems, 2010, 13: 765-781.
- [48] Wang K, Zhang T, Zhong X. Changes in the timing and duration of the near-surface soil freeze/thaw status from 1956 to 2006 across China[J]. The Cryosphere, 2015, 9: 1321-1331.
- [49] Che T, Li X, Jin R, et al. Snow depth derived from passive microwave remote-sensing data in China[J]. Annals of Glaciology, 2008, 49: 145-154.
- [50] Wu Qiqian, Wang Chuankuan. Effects of changes in seasonal snow-cover on litter decomposition and soil nitrogen dynamics

- in forests[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29: 2422-2432. [武启骞, 王传宽. 季节性积雪变化对森林凋落物分解及土壤氮动态的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29: 2422-2432.]
- [51] Aerts R, Callaghan T V, Dorrepaal E, et al. Seasonal climate manipulations result in species-specific changes in leaf nutrient levels and isotopic composition in a sub-arctic bog[J]. *Functional Ecology*, 2009, 23: 680-688.
- [52] He Jie, Yang Wanqin, Ni Xiangyin, et al. Effects of snow patch on the dynamics of potassium and sodium during litter decomposition in winter in a subalpine forest of western Sichuan [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, 38(6): 550-561. [何洁, 杨万勤, 倪祥银, 等. 积雪斑块对川西亚高山森林凋落物冬季分解过程中钾和钠动态的影响[J]. *植物生态学报*, 2014, 38(6): 550-561.]
- [53] Bokhorst S, Bjerke J W, Melillo J, et al. Impacts of extreme winter warming events on litter decomposition in a sub-arctic heathland [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010, 42: 611-617.
- [54] Dou Pengpeng, Wang Fang, Ma Yu, et al. Response of litter carbon, nitrogen and phosphorus to simulated leaching[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63: 3114-3123. [豆鹏鹏, 王芳, 马瑜, 等. 叶凋落物碳、氮和磷元素对模拟淋溶的响应[J]. *科学通报*, 2018, 63: 3114-3123.]
- [55] Yang Yulian, Wu Fuzhong, Yang Wanqin, et al. Effects of snow pack removal on soil hydrolase enzyme activities in an alpine *Abies faxoniana* forest of western Sichuan[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(22): 7045-7052. [杨玉莲, 吴福忠, 杨万勤, 等. 积雪去除对川西高山冷杉林冬季土壤水解酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(22): 7045-7052.]
- [56] Tan B, Wu F Z, Yang W Q, et al. Snow removal alters soil microbial biomass and enzyme activity in a Tibetan alpine forest [J]. *Applied Soil Ecology*, 2014, 76: 34-41.
- [57] Gartner T B, Cardon Z G. Decomposition dynamics in mixed-species leaf litter[J]. *Oikos*, 2004, 104: 230-246.
- [58] Li Yinong, Zhou Xiaomei, Zhang Naili, et al. The research of mixed litter effects on litter decomposition in terrestrial ecosystems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(16): 4977-4987. [李宜浓, 周晓梅, 张乃莉, 等. 陆地生态系统混合凋落物分解研究进展[J]. *生态学报*, 2016, 36(16): 4977-4987.]
- [59] Liu J, Liu X Y, Song Q N, et al. Synergistic effects: a common theme in mixed-species litter decomposition[J]. *New Phytologist*, 2020, 227: 757-765.
- [60] Lin Chengfang, Gao Ren, Chen Guangshui, et al. Research progress of litter decomposition model in forest ecosystem[J]. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2007, 34(3): 227-233. [林成芳, 高人, 陈光水, 等. 凋落物分解模型研究进展[J]. *福建林业科技*, 2007, 34(3): 227-233.]

Research progress in the effects of snow cover change on forest litter decomposition in China

ZHANG Peng^{1,2}, SUN Hongru^{1,2}, JIA Bingrui¹

(1. State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Forest litter decomposition plays an important role in maintaining the element cycle and nutrient balance of the ecosystem, which is affected by the freeze-thaw patterns under different levels of snow thickness. Freeze-thaw stage (i. e. freezing onset, deep freezing and thawing stage) is an important period of litter decomposition in permafrost zone, accounting for about a half of mass loss in the whole year. Reduced snow cover would decrease soil temperature and increase freeze-thaw cycles, which would influence litter decomposition. The paper reviewed the effects of snow cover on forest litter decomposition in the recent 10 years. Reduced snow cover would decrease litter mass loss, carbon element release and cellulose degradation during the freeze-thaw period and in the whole year, but increase during the growing season. Freeze-thaw action would result in litter physical fragmentation, and then accelerate litter decomposition in the following growing season. Reduced snow cover usually decreased nitrogen element release, but no clear trends were found in the growing season and whole year. There were some large differences in the results of phosphorus and lignin. Finally, the problems of snow cover effects on forest litter decomposition were discussed and the future research directions were prospected.

Key words: snow cover; freeze-thaw action; litter decomposition; mass loss; element release

(责任编辑: 牟翠翠; 编辑: 庞瑜, 周成林)