

DOI: 10.5846/stxb201808041660

李翹然,常顺利,张毓涛.天山雪岭云杉林粗木质残体储量特征.生态学报,2019,39(10): - .

Li X R, Chang S L, Zhang Y T. Attributes of coarse woody debris in *Picea schrenkiana* forests of Tianshan Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(10): - .

天山雪岭云杉林粗木质残体储量特征

李翹然¹, 常顺利^{1,*}, 张毓涛²

1 新疆大学资源与环境科学学院绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046

2 新疆林科院森林生态研究所, 乌鲁木齐 830063

摘要:粗木质残体(coarse woody debris, CWD)在天山雪岭云杉林生态系统中起着重要的结构性和生物地球化学作用,解释其储量特征是研究 CWD 的基础,但尚未有大尺度研究见诸报道。本文以天山雪岭云杉 8 hm² 森林动态监测样地为研究对象,采用野外调查、室内试验以及数据分析相结合的方法,调查了样地内 CWD 的储量组成、径级以及分解等级分布格局等基本特征及其影响因子。结果表明:(1)天山雪岭云杉 8 hm² 森林动态监测样地内共有直径≥10cm 的 CWD 936 株,CWD 的密度、体积、储量分别为 117 株/hm², 15.13 m³/hm², 4.52 t/hm²;其中倒木是 CWD 的主要贡献者,占 CWD 总储量的 52.21%;(2)样地内各径级 CWD 的数量呈典型的倒“J”型结构,直径<30cm 的 CWD 个体占全部 CWD 的 83%;(3)样地内 CWD 总体上处于以 II、III 分解等级为主的中度分解状态,CWD 径级越大,分解程度越高;(4)林分密度、郁闭度和海拔是影响天山雪岭云杉林 CWD 储量特征的主要因素。本研究可为天山雪岭云杉林的可持续发展与经营提供科学依据。

关键词:粗木质残体;枯立木;倒木;储量;雪岭云杉林

Attributes of coarse woody debris in *Picea schrenkiana* forests of Tianshan Mountains

LI Xuanran¹, CHANG Shunli^{1,*}, ZHANG Yutao²

1 Key Laboratory of Oasis Ecology, College of Resource and Environment Science, Xinjiang University, 830046, Urumqi, China

2 Institute of Forest Ecology, Xinjiang Academy of Forestry, 830063, Urumqi, China

Abstract: Coarse woody debris (CWD) plays important structural and biogeochemical roles in Tianshan *Picea schrenkiana* forest ecosystem processes. Explaining its storage characteristics is the basis for studying CWD. However, on a large-scale no studies have yet been reported. Based on the combination of field investigation, laboratory test and data analysis, study objectives of this report were to examine storage estimate by composition, diameter and decay class distributions and its effect factors in *P. schrenkiana* forest of Tianshan Mountains. Results indicate that: (1) A substantial number (936) of CWD (≥10cm diameter) exists in 8hm² *P. schrenkiana* forest dynamics plot. Density, volume and storage of CWD in this plot averaged 117 N/hm², 15.13 m³/hm² and 4.52 t/hm². Logs were the main contributor and accounted for 52.21% of the total CWD storage, while the percentage of snags and stumps were 20.58% and 27.21%. (2) We found that CWD quantity in *P. schrenkiana* forest by diameter class was followed the inverse J-shaped. The diameter distribution of this population is highly skewed towards smaller-sized (< 30cm dia.) CWD, which accounted for 83% of total CWD quantity. (3) In the sample plot, snags and logs are mainly at the mid-low decomposition level, while stumps are concentrated at decay class III, IV, and V. The distribution of total CWD by decay class is skewed toward decay class II and III. Overall, the current decay class distribution of CWD in *P. schrenkiana* forest appears to follow a natural progression of CWD decay. (4) Our results

基金项目:国家自然科学基金项目(U1503187);“十二五”农村领域国家科技计划课题(2015BAD07B03-03)

收稿日期:2018-08-04; 修订日期:2018-10-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ecocsl@163.com

also showed that the CWD diameter in the plot has a certain influence on the distribution of decay class. With the increase of the diameter, the degree of CWD decomposition continues to increase. (5) Stand density, canopy density and elevation are the main factors affecting the storage characteristics of CWD in *P. schrenkiana* forest of Tianshan Mountains. This study can provide a scientific evidence for the sustainable development and management of *P. schrenkiana* forest.

Key Words: coarse woody debris; snags; logs; storage; *P. schrenkiana* forest

粗木质残体(coarse woody debris, CWD)是组成森林生态系统的重要单元,主要由枯立木、倒木和树桩组成^[1-2],影响着森林物质循环^[1-3]、能量流动^[1-3]、生态水文^[1-4]、群落更新^[1-3]等过程,是森林生态系统中重要的养分库^[1,5]和碳库^[6]。此外,粗木质残体还与各种动植物的生活史密切相关,能够为真菌、苔藓植物、无脊椎动物以及鸟类提供栖息地^[1-2,7]。欧洲森林可持续管理评价体系已将粗木质残体储量作为研究森林生态系统可持续性和多样性的必要结构指标^[8]。因此,量化粗木质残体的储量将有助于加深对森林结构和功能的认识。

在生态系统尺度上,CWD 储量受到气候特征^[1-3]、森林类型^[9]、地形^[1-4]、林分特征^[1-2]、管理实践^[9,10]、自然和人为干扰^[11-12]等因素的影响。前人研究发现,树木死亡率和分解速率决定 CWD 储量的动态变化,前者主要受森林生物量、竞争和自疏以及自然干扰的影响,后者则受树种木材特性、径级、地面温湿度的影响^[1-5,9]。因此 CWD 储量成因复杂,又加之研究历史尚浅,对于探讨其是否具有地理空间规律性或是其他自然地理规律性存在一定难度。

总的来说,针叶林中 CWD 储量要高于落叶林,热带地区森林 CWD 的储量最少,全球范围内森林 CWD 储量为 1—1800 t/hm²^[1],温带天然针叶林 CWD 储量为 30—537 t/hm²,阔叶林及针阔混交林则为 8—50 t/hm²^[13]。我国天然针叶林 CWD 储量远低于全球平均水平,约为 0.09—91.75 t/hm²^[14]。这与我国 CWD 研究工作起步较晚,大多数研究采用了较大的 CWD 直径(大头直径 ≥ 7.6 cm 或 ≥ 10 cm)认定标准密切相关,同时也表明我国天然针叶林受到了较高度的人为干扰。

天山雪岭云杉林生态系统在涵养水源、固碳、保育生物多样性等方面具有重要的生态作用。天山雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)以单优势种的纯林形式构成了天山雪岭云杉林的主体。利用大型森林动态监测样地探讨 CWD 不仅有助于避免空间取样尺度对研究结果的影响和限制,还可获得长期的、大面积的生态研究数据,进而为更好地阐明群落动态演替规律及更新特征等科学问题提供理论依据。而以往在样方小尺度上的工作很难从整体上准确刻画天山雪岭云杉林 CWD 的类型与组成、径级结构、分解等级等储量特征^[15-16]。

因此,本文依托天山雪岭云杉 8hm²森林动态监测样地,通过样地调查以及数据分析,拟探讨:(1)天山雪岭云杉林 CWD 的储量特征;(2)CWD 储量特征与环境因子之间的关系,以期加深对天山雪岭云杉林结构和功能的认识,为生产实践提供理论依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域概况

研究区位于新疆乌鲁木齐县板房沟林场,属温带大陆性气候。年平均气温 2—3℃,最暖月(7月)平均气温 9.8℃,最冷月(1月)平均气温-13.8℃。年降水量 1134.1 mm,蒸发量 544.0 mm,年平均相对湿度 65%,最大积雪深度 65 cm。森林以天山雪岭云杉为单优树种的温带针叶林,林木平均胸径约为 14.0 cm,平均树高约为 11 m,郁闭度为 0.6—0.8^[17];林下灌木主要有异果小檗(*Berberisheteropoda*)、黑果枸杞(*Cotoneaster melanocarpus*)、金丝桃叶绣线菊(*Spiraea hypericifolia*)、新疆方枝柏(*Juniperus pseudosabina*)、锦鸡儿(*Caragana turkestanica*)、刚毛忍冬(*Lonicera hispida*)、密刺蔷薇(*Rosa spinosissima*)等。林下土壤为灰褐色森林土,土壤发育程度高,剖面分化明显,腐殖质层较厚。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与环境因子调查

参照 BCI 50 hm²热带雨林样地建设的技术规范^[18],研究团队于 2009 年 9 月在研究区建立了天山雪岭云杉 8 hm²森林动态监测样地(43°25′—43°26′ N, 87°27′—87°29′ E)。样地为 400m(东西)×200m(南北),用全站仪将整个样地划分成 200 个 20 m × 20 m 的样方^[19]。按相邻网格法,在天山雪岭云杉 8 hm²森林动态监测样地内逐一调查所有大头直径≥10cm 的 CWD,记录其类型、大小头直径、长度或高度以及分解等级等特征,并对每个样方的环境因子(海拔、郁闭度、坡度、坡向)进行调查。与此同时,在每个 20 m × 20 m 的样方采用“S”型 5 点取样法,取 0—60cm 的混合土样 500g,装入密封袋编号带回实验室,置于通风、阴凉、干燥的室内自然风干,研磨后过 0.149mm(100 目)筛备用。采用重铬酸钾氧化-外加加热法测定土壤有机碳,采用碱熔-钼锑抗比色法测定土壤全磷,土壤全氮测定采用扩散法,土壤全钾则采用碱熔-火焰光度法测定。

表 1 样地信息和群落特征汇总表

Table 1 Summary table of the basic information of plot and community characteristics							
坡向 Aspect	坡度 Slope	海拔/m Altitude	平均胸径/cm Mean DBH	平均树高/m Mean height	平均树龄/a Mean age	郁闭度 Canopy density	林分密度/(株/hm ²) Stand density
149°	5°—38°	1958—2188	14	11	54	0—0.9	1381

1.2.2 CWD 的判定及其分级标准

本研究依据现行国际分类标准,即 USDA Forest Service 和 LTER 制定的 CWD 定义规范,将大头直径≥10cm 的木质残体界定为粗木质残体(CWD)。CWD 的具体类型则采用 Harmon and Sexton(1996)进行的规定:倾斜度(偏离垂直方向)不超过 45°,大头直径≥10 cm,高度通常≥1 m 的木质残体为枯立木(Snag);倾斜度超过 45°的则归为倒木(Log);高度<1m,但其它特征与枯立木相似的则判定为树桩(Stump)^[20]。

基于研究现状,CWD 的分解等级参考现行运用最广泛的五级分类系统,采用直接与间接手段相结合的方法来判定^[21]。CWD 分解等级判定特征和方法详见表 2。

表 2 森林生态系统 CWD 的分类系统

Table 2 Classification system for CWD in forest ecosystem					
类型 Type	分解等级 Decay class				
	I	II	III	IV	V
枯立木 Snags	冠、枝、叶俱存,树皮 紧实,树身新鲜而 坚固	仅存大枝,树皮疏 松,树身坚固	仅存部分树皮,树身 开始腐烂	无冠、枝、叶与皮,树 身松散,腐烂程度高	成为倒木
倒木 Logs	结构完整,枝、叶、皮 俱存,木质体坚实	心材完好,边材腐 烂,树皮完整,大枝 存在,木质体较坚实	心材完好,边材消 失,部分树皮脱落, 仅存大粗枝,木质体 开始变软	心材腐烂,仅存部分 树皮,木质体变软	严重腐烂,木质体破碎 至粉末
树桩 Stumps	树皮完整紧密,树身 坚固	部分树皮脱落,树身 坚固	仅存部分树皮,树身 开始腐烂	无树皮,树身松散, 腐烂程度高	严重腐烂,木质体破碎 至粉末
间接手段	死不足 1 年,木质体 新鲜而坚固	开始分解,小刀尖端 可刺入几毫米	小刀可刺入约 2 厘米	小刀可刺入 2—5 厘米	小刀可轻易刺穿木 质体

1.2.3 CWD 密度测定

对分解较轻的 I、II、III 等级的 CWD,为方便测量,随机各选取三株倒木,从标准木树干的大、中、小头的中央地段分别截取 5cm 厚圆盘,采用排水法测定其体积,再将其烘干称重,体积与干重的比值即为密度。IV、V 等级的 CWD 则用小刀取部分样品放入已知容积的铝盒内,标号称取湿重,带回实验室烘干后称重,计算其密度。

1.3 数据分析方法

1.3.1 CWD 体积估算公式

本研究中 CWD 的储量根据 CWD 的密度与其体积的乘积得到。在查阅相关文献的基础上,选取以下 3 个公式来估算 CWD 的体积:

枯立木体积估算公式^[10]

$$V = D^2 \times H \times \frac{\pi}{4} \times f \quad (1)$$

倒木体积估算公式^[22]

$$V = (Ds^2 + Dl^2) \times L \times \frac{\pi}{8} \quad (2)$$

树桩体积估算公式^[23]

$$V = (Ds^2 + DsDl + Dl^2) \times H \times \frac{\pi}{3} \quad (3)$$

式中, V 为体积(m^3); D 为枯立木胸径(cm), H 为枯立木和树桩高度(m); Dl 为大头直径(cm), Ds 为小头直径(cm); L 为倒木长度(m); f 为形数(取 0.464)^[24]。

1.3.2 数据分析方法

本研究采用 Microsoft Excel 2010 软件对调查数据进行整理、计算及作图。采用国际通用软件 canoco5.0 中的冗余分析(redundancy analysis, RDA)探讨 CWD 储量特征与样地环境因子之间的影响。

2 结果与分析

2.1 天山雪岭云杉林 CWD 的储量特征

天山雪岭云杉 8hm^2 固定大样地内共有大头直径 $\geq 10\text{cm}$ 的 CWD 936 株, CWD 平均直径为 20.72 cm , 最大直径为 98 cm 。天山雪岭云杉为大样地内 CWD 的单一组成树种。CWD 的密度、体积和储量分别为 $117\text{ 株}/\text{hm}^2$, $15.13\text{ m}^3/\text{hm}^2$, $4.52\text{ t}/\text{hm}^2$ 。从 CWD 的组成形态来看, 尽管树桩的密度最大, 但倒木对 CWD 体积和储量的贡献最多, 是天山雪岭云杉森林中 CWD 的构成主体, 枯立木在 CWD 体积和储量中占比最少, 仅占 20% 左右(表 3)。

表 3 天山雪岭云杉森林不同类型 CWD 的储量及其分配

Table 3 Storage and allocation of different types of woody debris in *P.schrenkiana* forests of Tianshan Mountains

类型 Type	密度 Density		体积 Volume		储量 Storage	
	N/hm^2	占比 Ration %	m^3/hm^2	比例 Ration %	t/hm^2	占比 Ration %
枯立 Snags	$34 \pm 33\text{b}$	29.06	$2.73 \pm 3.30\text{b}$	18.04	$0.93 \pm 1.11\text{b}$	20.58
倒木 Logs	$35 \pm 15\text{b}$	29.91	$6.87 \pm 3.84\text{a}$	45.41	$2.36 \pm 1.10\text{a}$	52.21
树桩 Stumps	$48 \pm 27\text{a}$	41.03	$5.53 \pm 3.30\text{a}$	36.55	$1.23 \pm 0.67\text{b}$	27.21
合计 Total	117 ± 55	100	15.13 ± 6.98	100	4.52 ± 1.72	100

将 8hm^2 大样地分为 8 个 1hm^2 ($100\text{m} \times 100\text{m}$) 的样地进行数据统计($n=8$); 不同小写字母表示显著差异 $P<0.05$

2.2 天山雪岭云杉林 CWD 的径级分布特征

因尚无统一的径级划分标准, 在查阅相关文献的基础上, 结合本研究调查实况, 将天山雪岭云杉林 CWD 划分为 3 个径级。天山雪岭云杉林内各形式 CWD 的密度随着径级的增大而急剧减少, 呈现典型的倒“J”型结构(图 1)。其中小径级($10\text{—}20\text{cm}$ 、 $20\text{—}30\text{cm}$) CWD 多达 777 株, 约占全部 CWD 的 83%, 而中径级($30\text{—}40\text{cm}$ 、 $40\text{—}50\text{cm}$) 和大径级($50\text{—}60\text{cm}$ 、 $\geq 60\text{cm}$) 的 CWD 则仅占总数的 11% 和 6%。

与 CWD 的密度呈现较统一的径级分布不同, 天山雪岭云杉森林内不同类型 CWD 的储量在径级分布上则各有差异。其中, 枯立木的储量随着径级增大而减小, 为倒“J”型分布结构。倒木及树桩的储量在不同径级下的变化趋势相似, 都表现为“增长-降低-增长”的变化模式, 但与倒木储量峰值偏左不同的是, 树桩储量

峰值偏右,大径级个体是其主要组成部分。森林内全部 CWD 的储量在径级上表现为先降低后增长的“U”型结构,其径级储量顺序为:小径级(55.6%)>大径级(25%)>中径级(19.4%)。

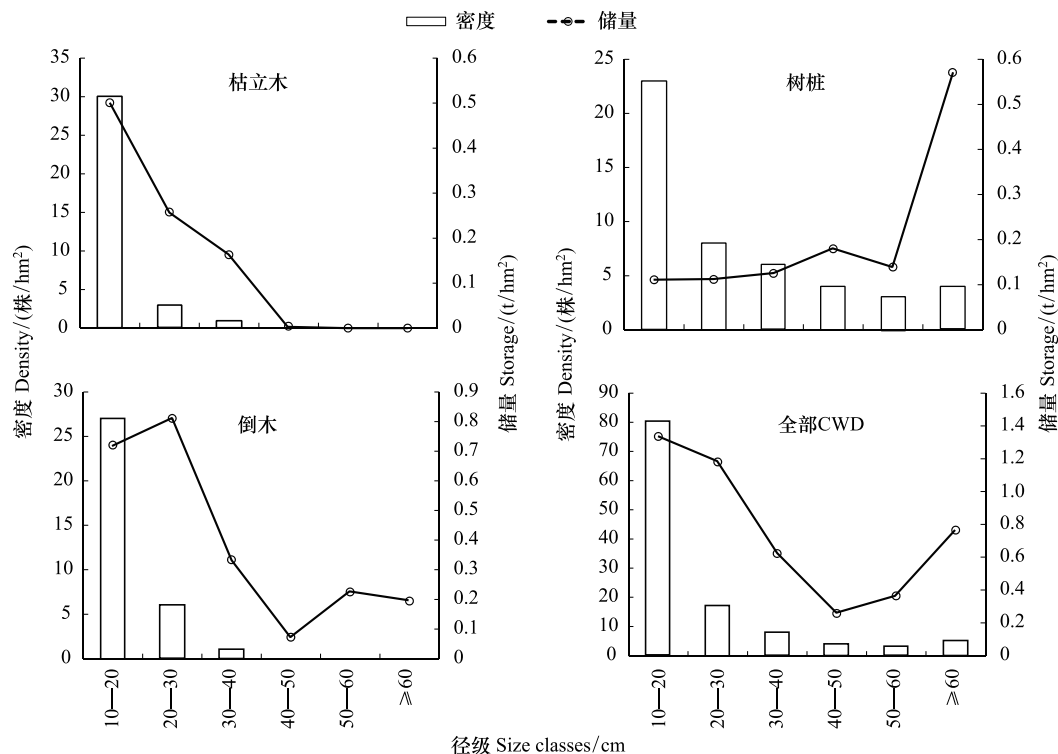


图1 天山雪岭云杉森林 CWD 的径级分布

Fig.1 Distribution of CWD by size class (cm) in *P. schrenkiana* forests of Tianshan Mountains

2.3 天山雪岭云杉林 CWD 的分解等级特征

天山雪岭云杉森林内全部 CWD 和枯立木的分解等级总体表现为近似正态分布,Ⅱ、Ⅲ分解等级居多(图2)。树桩集中于Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ分解等级,处于较高的分解水平,其密度随分解等级增加而增大。就倒木而言,Ⅰ分解等级的倒木占倒木总数的41%,但没有表现出明显的分布规律。

从储量上来看,枯立木和倒木的峰值均位于Ⅱ分解等级,呈现出随分解等级增大先增加后降低的变化趋势。树桩储量则表现出以Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ分解等级为主,随分解等级的增加先降低后增长的模式。林内全部 CWD 的储量主要集中在Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ分解等级,约占全部 CWD 储量的85%,Ⅳ、Ⅴ分解等级则仅占15%。

2.4 天山雪岭云杉林 CWD 的径级与分解等级间的关系

天山雪岭云杉森林 CWD 的径级与分解等级存在一定联系。样地内枯立木以中小径级为主,表现出随着径级增大,低分解程度 CWD 占比不断增大且分解等级逐渐趋于单一的分配格局(图3)。树桩在所有径级上都具有完整的分解体系,均以Ⅳ、Ⅴ分解等级的 CWD 为主。随着径级的增大,高分解等级个体占比不断增大,在≥40cm 的各个径级上,Ⅳ、Ⅴ分解等级的树桩占比高达65%—87%。倒木分解等级在径级上则没有表现出明显的分布规律。纵观整个大样地,Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ分解等级是小径级 CWD 的主体,而大径级 CWD 则以Ⅳ、Ⅴ分解等级为主,呈现出 CWD 径级越大,分解程度越高的分布趋势。

2.5 天山雪岭云杉林 CWD 与环境因子的冗余分析

以冗余分析(RDA)的方法探讨了 CWD 组成、径级分布以及分解等级结构与样地内各因子之间的关系,并分别绘制了其 RDA 二维排序图。图中箭头代表不同的影响因子:AL(海拔)、CD(郁闭度)、AS(坡面)、SL(坡度)、SD(标准密度)、H(平均树高)、DIA(平均直径)、SOC(有机碳)、N(全氮)、P(全磷)、K(全钾),射线越长代表其影响越大。CWD 的组成与影响因子之间的二维排序图(图4)前两轴特征值分别为0.23和0.

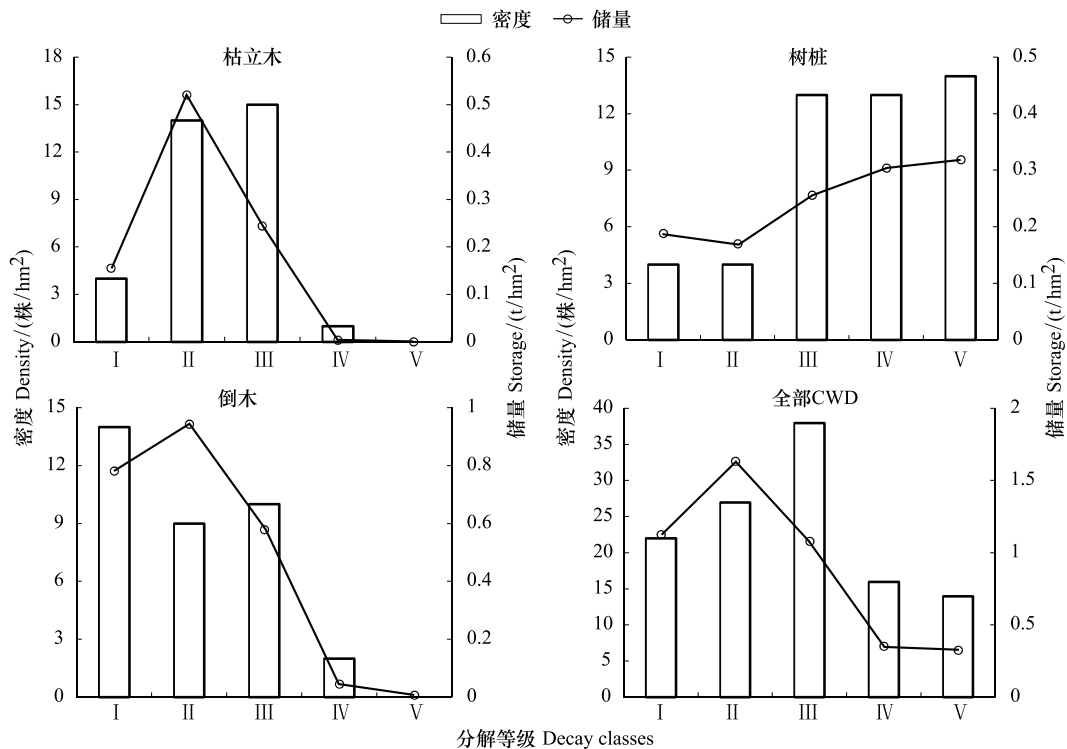


图2 天山雪岭云杉森林 CWD 的分解等级分布

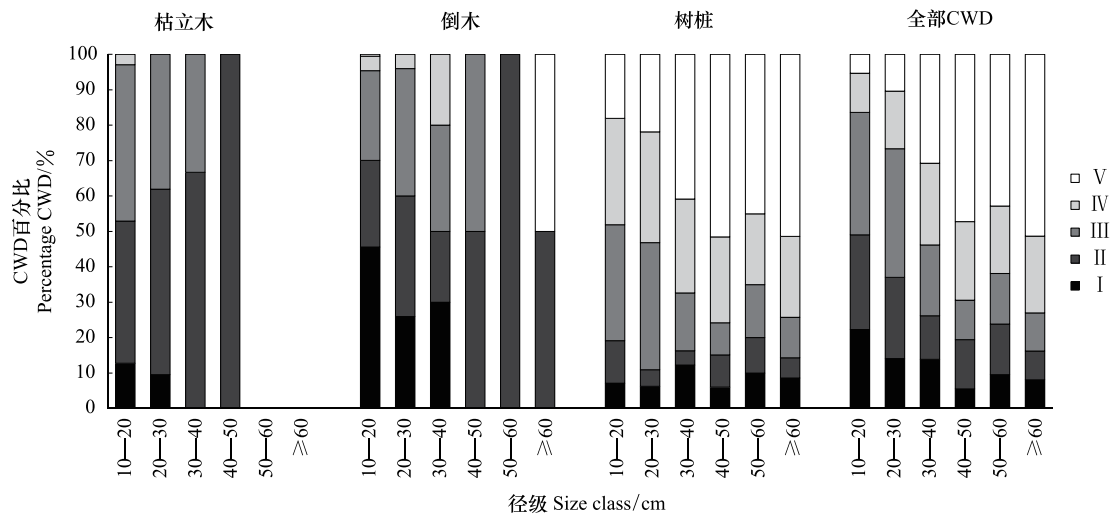
Fig.2 Distribution of CWD by decay class in *P. schrenkiana* forests of Tianshan Mountains

图3 天山雪岭云杉森林 CWD 分解等级的径级分布

Fig.3 Decay distribution of CWD by size class (cm) in *P. schrenkiana* forests of Tianshan Mountains

16,共解释了 CWD 组成数据累积方差值的 39.01%。除林分密度对 CWD 组成的影响呈极显著水平($P < 0.01$)以及郁闭度和海拔呈现出显著相关($P < 0.05$)外,其他环境因子对 CWD 组成结构的影响较小。CWD 的径级与环境因子之间的二维排序图(图 5)前两轴特征值分别为 0.38 和 0.05,累积贡献率为 42.59%。11 个环境因子中,仅郁闭度、海拔、林分密度和坡向与 CWD 径级分布呈显著相关($P < 0.05$)。CWD 分解等级与环境因子之间的 RDA 分析结果显示,第一、二轴分别解释了数据累积方差值的 25.07%和 8.39%。通过蒙特卡洛检验对各因子影响程度进行显著性检验发现,林分密度、海拔、平均树高和郁闭度与 CWD 分解等级结构显著相关

($P<0.05$),其他环境因子对其影响不大(图 6)。综上所述,林分密度、郁闭度和海拔是影响天山雪岭云杉森林 CWD 储量特征的三大主导因子。

3 讨论与结论

3.1.1 天山雪岭云杉林 CWD 储量特征

天山雪岭云杉林内 CWD 储量为 4.52 t/hm^2 ,远低于全球针叶林 CWD 储量的平均值^[13],处于中国针叶林 CWD 储量范围的下限^[14],与俄罗斯西北部苏格兰松树林 CWD 的储量相近^[25]。造成这种现象的原因可能是:首先不同的研究采取的 CWD 界定标准不同;其次,天山雪岭云杉林是以天山雪岭云杉为单优势种的纯林,树种单一,结构简单,生物多样性低,种内种间竞争不激烈,因而森林树木死亡率较低。本研究结果接近马现永等^[16]在天山中部云杉森林内对 CWD 的储量估计值,仅为刘翠玲等^[15]汇报的西天山云杉森林储量的 5%。这是因为虽同处于天山山脉,但天山西部伊犁地区受大西洋暖湿气流的影响,自然条件明显优于天山中部及东部,导致西天山森林生物量明显高于中东部,造成同一山脉不同研究区 CWD 储量迥异。

不同类型森林生态系统 CWD 的组成特征不尽相同。倒木是天山雪岭云杉林 CWD 的主要组成部分,占全部 CWD 储量的 52.21%(表 3),这与其他类型森林生态系统的的结果相符^[14-16,26-27]。据分析,出现这一现象的原因可能与天山雪岭云杉自身特性和研究区气候条件相关。天山山区春冬季多大风、暴雪天气,而天山雪岭云杉为浅根性树种,故容易形成大量以拔根倒、干基、干中折断方式存在的倒木。其次,枯立木严重分解时会倒伏在地,也在一定程度上增加了倒木的数量。

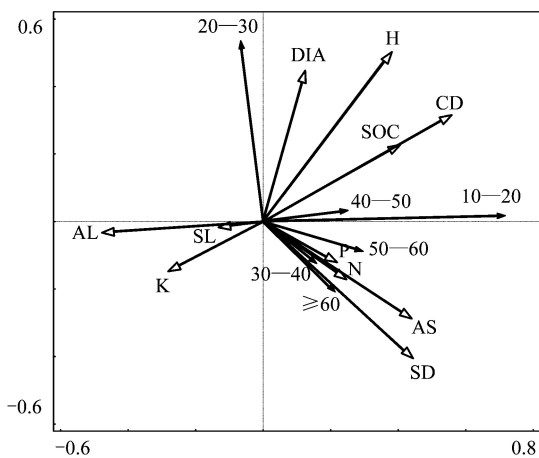


图 5 CWD 径级与影响因子的冗余度分析
Fig.5 Redundancy Analysis (RDA) of the CWD size classes and effect factors

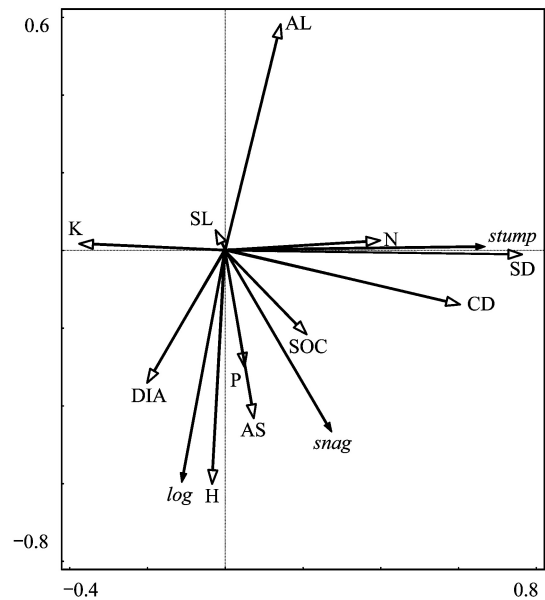


图 4 CWD 组成(枯立木,倒木和树桩)与影响因子的冗余度分析
Fig.4 Redundancy Analysis (RDA) of the CWD compositions (logs, snags, and stumps) and effect factors

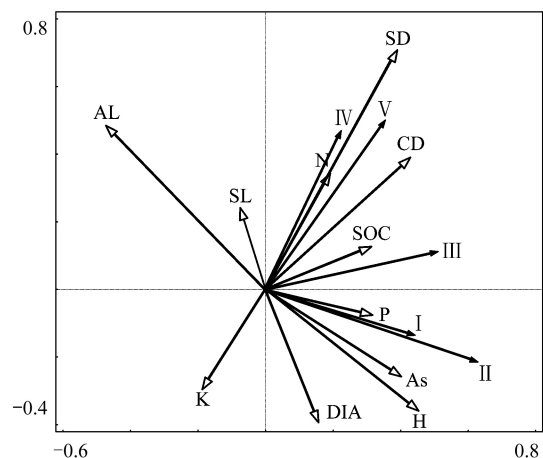


图 6 CWD 分解等级与影响因子的冗余度分析
Fig.6 Redundancy Analysis (RDA) of the CWD decay classes and effect factors

以往研究表明,受人为干扰严重的森林生态系统中 CWD 的主体为树桩^[11,28],本研究结果表明,天山雪岭

云杉林 CWD 组成中树桩的密度最大。这主要是因为研究区地处牧区,在未建成固定动态监测样地前,受到了较严重的人为干扰。大量雪岭云杉被砍伐为薪柴或建筑材料,从而余留了大量的伐桩,再加之干基、干中折断形式倒伏个体残留的树桩,最终造成了天山雪岭云杉林中树桩密集的现状。

径级是表征森林种群结构的重要生态因子,能够在一定程度上反映种群年龄及群落发展现状^[1-2,29]。一些研究表明,森林树木死亡率与其径级密切相关^[29-31]。天山雪岭云杉林内 CWD 径级分布高度偏向小径级个体,与其他研究得出的径级越小,死亡率越高的结论相符^[11-16,25-30]。结合王慧杰^[32]、张毓涛^[33]等人的研究,我们发现样地内 CWD 的径级结构与活立木相一致,这表明天山雪岭云杉森林属稳定增长型群落,林下存在大量幼龄树个体,密度制约效应显著,小径级个体易受个体竞争和自疏效应死亡。此外,暴雪、大风及大树倾倒等外力作用也会造成林下小径级个体的机械性损伤和死亡。相对于小树而言,大树具有更强的资源竞争力和灾害抵抗力,通常生长稳定,多为大风、暴雪等外力所致,因此数量较少^[29-30,34]。

CWD 的分解过程是森林生态系统物质循环的重要环节^[1-3],是 CWD 发挥其各项功能的重要基础^[35],因此,了解 CWD 的分解等级分布就显得尤为重要。不同类型的 CWD,其分解等级也表现出不同的分布规律。天山雪岭云杉林内枯立木和倒木主要集中于 I、II、III 分解等级,分解程度较低;树桩却处于高分解程度,以 IV、V 分解等级为主。这是雪岭云杉本身分解速率较慢,又有人为干扰历史的结果。树木被砍伐后倒木被及时清理利用,而树桩却长期存在于森林中,从而导致其分解程度较高。总体上来说,天山雪岭云杉森林内 CWD 以 II、III 分解等级居多,呈近似正态分布,与其他研究结果相似,表明天山雪岭云杉森林 CWD 输入量和输出量相对稳定。

3.1.2 天山雪岭云杉森林 CWD 径级与分解等级的联系

CWD 的分解速率不仅取决于树种和环境,也与 CWD 个体的直径密切相关^[1-2]。以往的许多研究已经证实,CWD 的分解速率与个体直径之间存在负相关关系,即小径级 CWD 通常具有比大径级 CWD 更快的分解速率^[1,29,36-37]。大径级 CWD 比表面积相对较小,呼吸速率较低是造成这种现象的主要原因^[38]。M Jomura 等人就曾报道,直径 3cm 的 CWD 的呼吸速率约为直径为 15cm 的 CWD 的两倍^[37]。然而与以往的大部分研究结果相悖,天山雪岭云杉林中 CWD 整体上表现出直径越大,分解程度越高的分布格局。造成这一结果的原因可能有二:一是在天山雪岭云杉森林 CWD 组成中,树桩在数量上占比大,除存留在森林中时间较长外,以往的研究中也证实,同等条件下,树桩比枯立木和倒木分解地更快^[38],这就造成树桩径级大、分解程度高,从而对全部 CWD 的分解等级在径级上的分布产生了重要影响。二是该研究区受到一定的人为干扰,中小径级 CWD 一般被牧民捡拾为薪柴利用,现存小径级 CWD 多为新输入的倒木和因与土壤接触面积少,分解速率较慢的枯立木。大径级 CWD 因其体积过大、质量过重,又受地形因素影响难以搬运,得以长期存在于森林中,从而表现出较高的分解状态。

在本研究中,由于所有分解等级的 CWD 都位于具有类似土壤生物群和气候条件的同一片森林中,因此可以就径级对 CWD 分解等级的影响提出一些一般性评论。但实际上 CWD 分解速率和直径大小之间的相关性在某种意义上是有争议的。因此,为进一步阐明 CWD 直径大小对其分解速率的影响,需要对 CWD 进行更深入的研究。

3.1.3 天山雪岭云杉森林 CWD 储量特征的影响因素

树木死亡是多种生物、非生物因素共同作用的结果,是群落自我调节的一种方式,在森林生态系统中起着重要的作用^[39]。本研究结果显示,林分密度与 CWD 储量特征显著相关。一方面,较高的林分密度可能促使林木在拥挤的生存环境中产生更激烈的资源竞争,从而导致较高的死亡率。另一方面,林分密度越高,植被受到干扰的几率也越高。其次,本研究发现,郁闭度和海拔也对 CWD 结构特征产生显著影响,其中海拔与 CWD 径级和分解等级结构均呈现负相关关系。造成这种现象的原因可能是,海拔越高,森林密度越小,风力越大,CWD 易受到风力及坡度影响滑落至海拔较低区域,造成大径级和较高分解等级 CWD 集中于低海拔地区。土壤因子等对 CWD 结构特征解释程度较低,考虑应当为大样地内土壤条件等差异较小的缘故。

总体而言,天山雪岭云杉森林 CWD 的储量特征的形成受到其自身特性、自然环境、人为干扰历史以及森林发育阶段等多种因素的综合影响。借助大样地长期监测森林生物量动态(包括 CWD)不仅有利于澄清 CWD 在森林生态系统物质循环中的作用,同时也可以探明影响 CWD 的多重因素,有助于揭示 CWD 的动态变化机制。本研究初步解释了天山雪岭云杉森林 CWD 的储量特征及其影响因子,但研究工作仍处于起步阶段,未来将会就 CWD 空间结构、碳循环、养分循环等方面做相应研究分析,进一步深入了解其内在发展机制,为未来制定合理的森林 CWD 管理规定提供合理依据。

3.2 结论

天山雪岭云杉森林内 CWD 的平均储量分别 4.41 t/hm^2 ,处于中国针叶林储量范围的下限。林内 CWD 径级分布高度偏向小径级个体,总体上处于以 II、III 分解等级为主的中度分解状态。样地内 CWD 径级越大,分解程度越高。林分密度、郁闭度和海拔对天山雪岭云杉森林 CWD 结构特征影响显著。天山雪岭云杉森林 CWD 的储量特征的形成与自身特性、自然环境以及人为干扰历史密切相关。

参考文献(References):

- [1] Harmon M E, Franklin J F, Swanson F J, Sollins P, Gregory S V, Lattin J D, Anderson N H, Cline S P, Aumen N G, Sedell J R, Lienkaemper G W, Gromack Jr K, Cummins K W. Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems. *Advances in Ecological Research*, 1986, 15: 133-302.
- [2] Franklin J F, Shugart H H, Harmon M E. Tree Death as an Ecological Process. *Bioscience*, 1987, 37(8):550-556.
- [3] Cindy E. Prescott, Kirsten Corrao, Anya M. Reid, Jenna M. Zukswert, Shalom D. Addo-Danso. Changes in mass, carbon, nitrogen, and phosphorus in logs decomposing for 30 years in three Rocky Mountain coniferous forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 2017, 47(10).
- [4] Lindenmayer D B, Noss R F. Salvage logging, ecosystem processes, and biodiversity conservation. *Conservation Biology the Journal of the Society for Conservation Biology*, 2006, 20(4):949.
- [5] Johnson C E, Siccama T G, Denny E G, Koppers MM, Vogt DJ. In situ decomposition of northern hardwood tree boles: decay rates and nutrient dynamics in wood and bark. *Canadian Journal of Forest Research*, 2014, 44(12):1515-1524.
- [6] Iwashita D K, Litton C M, Giardina C P. Coarse woody debris carbon storage across a mean annual temperature gradient in tropical montane wet forest. *Forest Ecology & Management*, 2013, 291(2):336-343.
- [7] Yu F, Ando Y. Species effects of bryophyte colonies on tree seedling regeneration on coarse woody debris. *Ecological Research*, 2018, 33(1): 191-197.
- [8] Christensen M, Hahn K, Mountford E P, Ódor P, Standovír T, Rozenbergar D, Diaci j, Wijdeven S, Meyer P, Winter S, Vrska T. Dead wood in European beech (*Fagus sylvatica*) forest reserves. *Forest Ecology & Management*, 2005, 210(1):267-282.
- [9] 袁杰. 秦岭火地塘林区主要森林类型粗木质残体研究[D]. 西北农林科技大学, 2016.
- [10] Bölöni J, Ódor P, Ádám R, Keeton W S, Aszalós R. Quantity and dynamics of dead wood in managed and unmanaged dry-mesic oak forests in the Hungarian Carpathians. *Forest Ecology & Management*, 2017, 399:120-131.
- [11] 谷会岩,代力民,王顺忠,于大炮,周莉. 人为干扰对长白山红松阔叶混交林粗木质残体的影响. *林业科学*, 2006(10): 1-5.
- [12] 梁宏温,温琳华,温远光,梁家善,黄道京. 特大冰雪灾害干扰下大明山常绿阔叶林木质残体的贮量特征. *林业科学*, 2012, 48(3): 11-16.
- [13] 陈华, Harmon M E. 温带森林生态系统粗木质物动态研究——以中美两个温带天然林生态系统为例. *应用生态学报*, 1992(02): 99-104.
- [14] 肖洒,吴福忠,杨万勤,常晨晖,李俊,王滨,曹艺. 高山峡谷区暗针叶林木质残体储量及其分布特征. *生态学报*, 2016, 36(05): 1352-1359.
- [15] 刘翠玲,潘存德,梁瀛. 鳞毛蕨天山云杉林粗木质残体贮量及其分解动态. *干旱区地理*, 2009, 32(02): 175-182.
- [16] 马现永. 天山云杉粗木质残体生态功能特性研究[D]. 合肥市:安徽农业大学, 2013..
- [17] 王慧杰. 天山雪岭云杉 8ha 森林动态监测样地的群落动态及其影响因素[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2016.
- [18] Condit R, Hubbell S, Foster R. BCI 50 ha Plot 1982-2005 Census Data. 2006.
- [19] 张毓涛,常顺利,芦建江,李翔,王智,师庆东,张新平. 天山云杉森林 8hm² 样地的建立及三维可视化管理. *林业科学*, 2011, 47(10): 179-183.
- [20] Harmon M E, Sexton J. Guidelines for Measurements of Woody Detritus in Forest Ecosystems. Seattle WA: US LTER Network Office, 1996.

- [21] 闫恩荣, 王希华, 黄建军. 森林粗死木质残体的概念及其分类. 生态学报, 2005(01): 158-167.
- [22] Waddell K L. Sampling coarse woody debris for multiple attributes in extensive resource inventories. *Ecological Indicators*, 2002, 1(3):139-153.
- [23] Sweeney O F M, Martin R D, Irwin S, Kelly T C, O'Halloran J, Wilson M W, McEvoy P M. A lack of large-diameter logs and snags characterises dead wood patterns in Irish forests. *Forest Ecology & Management*, 2010, 259(10):2056-2064.
- [24] 嚴廣雪, 孙光庭. 新疆雪岭云杉立木求积式及形数和形率关系式的论证. 新疆农业科学, 1959(11):33-38.
- [25] Boothroyd A, Carty H. Amount and distribution of coarse woody debris in pine ecosystems of north-western Spain, Russia and the United States. *Forest Biogeosciences and Forestry*, 2014, 7(1):53-60.
- [26] 刘妍妍, 金光泽. 小兴安岭阔叶红松林粗木质残体基础特征. 林业科学, 2010, 46(4): 8-14.
- [27] Yuan J, Jose S, Zheng X F, Cheng F, Hou L, Li J X, Zhang S X. Dynamics of Coarse Woody Debris Characteristics in the Qinling Mountain Forests in China. *Forests*, 2017, 8(10):403.
- [28] Yan E R, Wang X H, Huang J J, Zeng F R, Gong L. Long-lasting legacy of forest succession and forest management: Characteristics of coarse woody debris in an evergreen broad-leaved forest of Eastern China. *Forest Ecology & Management*, 2007, 252(1):98-107.
- [29] 吴浩. 亚热带常绿落叶阔叶混交林枯立木空间格局及树木死亡驱动因子研究——以八大公山 25ha 样地为例[D]. 武汉: 中国科学院大学, 2016.
- [30] 刘万德, 臧润国, 丁易, 张伟银, 苏建荣, 杨民. 海南岛霸王岭热带季雨林树木的死亡率. 植物生态学报, 2010, 34(8):946-956.
- [31] 索炎炎. 长白山阔叶红松林槭属树种时空格局及其共存机制[D]. 中国科学院大学, 2016.
- [32] 王慧杰, 常顺利, 张毓涛, 谢锦, 何平, 宋成程, 孙雪娇. 天山雪岭云杉森林群落的密度制约效应. 生物多样性, 2016, 24(03):252-261.
- [33] 张毓涛, 李吉玫, 常顺利, 李翔, 芦建江. 天山中部天山云杉种群空间分布格局及其与地形因子的关系. 应用生态学报, 2011, 22(11): 2799-2806.
- [34] 卢杰, 郭其强, 郑维列, 徐阿生. 藏东南高山松种群结构及动态特征. 林业科学, 2013, 49(08): 154-160.
- [35] Herrmann S, Kahl T, Bauhus J, Bauhus J. Decomposition dynamics of coarse woody debris of three important central European tree species. *Forest Ecosystems*, 2015, 2(04):339-352.
- [36] Yu F, Katsumata S, Mori A S, Osono T, Takeda H. Accumulation and decay dynamics of coarse woody debris in a Japanese old-growth subalpine coniferous forest. *Ecological Research*, 2014, 29(2):257-269.
- [37] Mayuko J, Yuji K, Masako D, Yoichi K. Spatial variation in respiration from coarse woody debris in a temperate secondary broad-leaved forest in Japan. *Forest Ecology & Management*, 2008, 255(1):149-155.
- [38] Siitonen J, Martikainen P, Punttila P, Rauh J. Coarse woody debris and stand characteristics in mature managed and old-growth boreal mesic forests in southern Finland. *Forest Ecology & Management*, 2000, 128(3):211-225.
- [39] McCoy M W, Gillooly J F. Predicting natural mortality rates of plants and animals // *Ecology Letters*. 2008:710-716.