

冰雪灾害对杉木林土壤特性的影响

陈凤霞^{1,2}, 许松葵³, 薛 立^{1,*}, 陈红跃¹, 冯慧芳¹, 傅静丹¹

(1. 华南农业大学林学院, 广东 广州 510642; 2. 琉球大学理学部, 日本 冲绳 903-0213;

3. 广东省林业种苗与基地管理总站, 广州 510173)

摘要: 2008年初, 在波及我国南方大部分地区的雨雪冰冻灾害中, 冻雨在杉木枝叶上形成冰柱, 造成大量的杉木个体折冠。通过开展杉木林凋落物和树干残体的养分及土壤理化性质的研究, 可以了解冰雪灾害后杉木林的土壤肥力动态。冰雪灾害造成的林冠折损引起了林地的光照增强, 导致了土壤温度上升及土壤水分增加, 从而促进了凋落物的分解, 凋落物经过1a的分解后, N、P和K含量分别下降了7%、12%和21%。凋落物储量减少了22%, N、P和K的储量分别下降了27%、31%和38%。2009年树干残体的N和P含量分别上升5%和6%, 而K含量降低15%。树干残体由于分解缓慢, 其储量下降3%, N储量增加了2%, P储量不变, 而K储量下降了18%。冰雪灾害后森林凋落物积累于地表, 分解后形成较厚的有机质层, 土壤结构因此变得疏松。2009年的土壤容重和毛管孔隙度减小, 总空隙度和毛管持水量增加, 非毛管孔隙显著增加。林冠残体在分解过程中促进了土壤有机质和养分的积累。2009年的土壤pH降低, 有机质、全N、全P和全K含量分别增加了16%、11%、14%和8%, 碱解N和速效P含量分别增加了113%和17%, 而速效K含量下降了36%。

关键词: 杉木; 冰雪灾害; 凋落物; 树干残体; 土壤物理性质; 土壤养分

Effect of ice-snow damage on soil characteristics in a *Cunninghamia lanceolata* stand

CHEN Fengxia^{1,2}, XU Songkui³, XUE Li^{1,*}, CHEN Hongyue¹, FENG Huifang¹, FU Jingdan¹

1 College of Forestry, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2 Faculty of Science, University of the Ryukyus, Okinawa 903-0213, Japan

3 General Administration Station of Forestry Seeds, Seedlings and Afforestation Bases, Guangzhou; 510173, China

Abstract: Early in 2008, a frozen rain and snow weather spreading over most parts of south China caused a big disaster. Icicles were produced on branches and leave of *Cunninghamia lanceolata* trees by sieves, resulting in that many live trees were damaged by crown breaking. The crown breaking coming from ice-snow damage caused an increase in solar radiation, which promoted litter decomposition by increasing soil temperature and water. The objective of this study is to assess the effect of the ice-snow damage on litter nutrients and nutrients of woody debris as well as soil physical and chemical properties. In comparing with those one year ago, N, P and K contents of litter decreased by 7%, 12% and 21%, respectively, litter amount decreased by 22%. As a result, N, P and K amounts of litter decreased by 27%, 31% and 38%, respectively. In 2009, N and P contents of woody debris increased by 5% and 6%, respectively, whereas K content decreased by 15%. Woody debris amount decreased by 3% due to its slow decomposing, and its N amount increased by 2%, P amount remained constant, whereas K decreased by 18%. Litter accumulated on ground after ice-snow damage, which caused a thick organic matter layer after litter decomposition, so that the soil became porous. Soil bulk density and capillary porosity of soil decreased, total porosity and capillary moisture capacity increased and non-capillary porosity significantly increased in 2009. Accumulations of soil organic matter and nutrients were accelerated during litter and stem debris decomposition. The pH value of soil decreased in 2009, contents of soil organic matter, total N, total P and total K

基金项目: 广东省科技项目(2008A020100013); 广东省林业局资助项目“森林生态科技研究与推广”

收稿日期: 2009-09-24; 修订日期: 2009-12-31

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: forxue@scau.edu.cn

increased by 16%, 11%, 14% and 8%, respectively, and alkalinized N and available P increased by 113% and 17%, respectively, whereas available K decreased by 36%.

Key Words: *Cunninghamia lanceolata*; ice-snow damage; litter; stem debris; soil physical property; soil nutrient

2008年1月下旬,雨雪及冰冻天气袭击了广东粤北地区。树木枝条上形成冰柱,造成枝干折断,导致大量的林木受伤。大面积的林冠残体覆盖林地,可以改变林地的涵养水源功能,同时折断的枝叶可以增加林地的养分输入,引起土壤特性的变化。国外对森林冰雪灾害进行过一定的研究,如 Bruederle 和 Stearns^[1] 和 Melacon 和 Lechowicz^[2] 研究了冰雪对南威斯康星森林的影响,De Stevens 等^[3] 报道了冰雪灾害后 *Fagus-Acer* 森林的组成变化,Seischab 等^[4] 和 Rebertus 等^[5] 调查了冰雪灾害对不同森林的损害程度,Mou and Warrillow^[6] 报道了冰雪灾害对森林更新的影响,Smolnik 等^[7] 研究了冰雪灾害对森林树种生长的影响。国外对森林冰雪灾害的研究起始于东北,如李秀芬等和 Zhu 等^[8-10] 对辽东地区天然次生林雪灾进行过研究。2008年初的冰雪灾害后,国内对亚热带森林的冰雪灾害进行了一定的研究,主要集中在冰雪灾害对森林的损害方面^[11-15],而对冰雪灾害引起的林冠残体和土壤的变化鲜有报道,如骆土寿等报道冰雪灾害造成广东杨东山常绿与落叶混交林产生的非正常凋落物量为 $13.96\text{--}19.59 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[16],薛立等发现冰雪灾害后粤北杉木林的林冠残体干重达 $25.99 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[17],田大伦等对冰冻灾害前后的柰树和杜英混交林进行研究表明,林内土壤含水量、全P、全K含量显著增加,速效N、速效P和速效K含量明显减少^[18]。

由冰雪灾害产生的林冠残体属于非正常凋落物,而凋落物通过养分释放构成森林生态系统中养分循环的重要通道^[19],对于提高林地的生产力有重要影响^[20]。凋落物覆盖于地表,可以保持土壤水分、缓和土壤温度、减少水土流失^[21],为土壤动物提供居所和为微生物提供养分来源^[22]。冰雪灾害产生的树干残体贮藏着大量的养分,通过缓慢分解逐渐释放养分,这对于在高温多雨的亚热带林区长期维持林地较高的生产力和森林的恢复有重要意义^[23]。森林植物通过凋落物和树干残体的形式将有机物和吸收的养分不断归还给土壤,并通过微生物等的分解释放出来,构成土壤与植物间的物质循环^[24]。

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是中国南方最重要的速生优良用材树种,在南方林业生产中占有举足轻重的地位。研究杉木冰雪灾害后非正常凋落物的动态、树干残体的养分贮量规律及其与土壤肥力的关系,有助于深入了解非正常凋落物和树干残体对森林生态系统养分循环的影响,可以为森林恢复提供依据。

1 材料与方法

研究地地处始兴县马市镇瑶头,位于南岭山脉南侧($114^{\circ}04'\text{E}, 24^{\circ}57'\text{N}$),属中亚热带气候,全年热量充足,冷暖交替明显,春季低温阴雨,夏季高温多湿,秋季昼暖夜凉,冬季寒冷干燥。年均气温 19.6°C ,月均最低气温 9.4°C (1月份),月均最高气温 28.4°C (7月份)。全年无霜期 296d,年降雨量 1825mm,多集中于4—6月份。土壤为紫红土。

2008年的试验林为12年生杉木人工林,密度 $2100 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$,绝大部分断顶。2008年2月在林分内设置 $20 \text{ m}\times 20 \text{ m}$ 的样地,3个重复。样地的海拔为 678.2 m,坡向 NW 40° ,坡度 25° 。用围尺和竹竿分别测定每株树木的树高和胸径,计算出残干的平均胸径为 9.6 cm,平均高为 5.0 m。在每个样地设立 5 个 $1 \text{ m}\times 1 \text{ m}$ 的小样方,调查林下植物种类和盖度。林下植物以红椎 *Castanopsis hystrix*、岭南青冈 *Cyclobalanopsis championii*、狗脊蕨 *Woodwardia japonica*、钩藤 *Ramulus uncariae*、光枝葵叶柃 *Eurya cuneata*、暗色拔葜 *Smilax lanceaefolia* 为主,盖度为 15%。

2008年2月在林冠残体仍然保持新鲜状态时,在每个样地内设置面积为 $2 \text{ m}\times 2 \text{ m}$ 的样方 6 个。调查时样方内林冠残体,包括林木主干折断部分构成的树干残体(包含干和皮)、枝和绿叶。测定样方内林冠残体各组分及凋落物鲜重。林冠残体的枝干的一部分在样方内时,用锯将样方内外的枝干锯断分开,将样方内林的枝干全部称重。2008年林冠残体的枝、绿叶和凋落物的养分储量之和除以三者的干重,得出 2008 年凋落物

的养分含量。2009年2月林冠残体的枝和叶无法和凋落物区分,因此在原样方将林冠残体的枝和叶和凋落物合并为凋落物,调查其鲜重和树干残体鲜重。在各样方取少量样品混合后带回实验室,在80℃恒温下烘干至恒重,测定含水率和测定N、P和K含量。N用半微量凯氏法测定,P用钼兰比色法,K用原子吸收分光光度计测定^[25]。

2008年2月和2009年2月在样地用环刀采取土样,3次重复,并用常规方法对0—40 cm处土壤进行5点取样,带回实验室进行化学性质的分析。用环刀法测容重、毛管持水量等物理性质;用烘干法测自然含水量。将水土以2.5:1混合后用pH计测土壤;有机质用重铬酸钾容量法测定;全N用半微量凯氏法测定;用氢氧化钠碱熔法将土壤样品溶融后提取待测液,用钼蓝比色法测全P,火焰光度计测全K;碱解N用碱解扩散法测定;用0.5 mol·L⁻¹的碳酸氢钠提取土壤样品后,用钼蓝比色法测有效P,用1 mol/L乙酸铵提取土壤样品后,用火焰光度计测有效K^[25]。

每个样品做3次重复测定,结果取重复测定的平均值。

用Microsoft Excel作图,并对处理和对照的数据平均值进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 凋落物的养分变化

非正常凋落物是指在极端天气、火灾或地质灾害等条件下产生的“凋落物”,在外力作用下产生的植物个体或植物器官的新鲜残体^[26]。本研究中,2008年刚发生冰雪灾害时杉木林冠残体中的枝和叶和正常凋落物一起构成凋落物层。

与2008年相比,2009年的凋落物N和P含量显著降低($P < 0.05$),而K含量极显著降低($P < 0.01$)(图1)。2008年调查杉木冰雪灾害样地时,由于杉木林冠被破坏不久,枝叶保持新鲜状态,而叶是树木光合作用

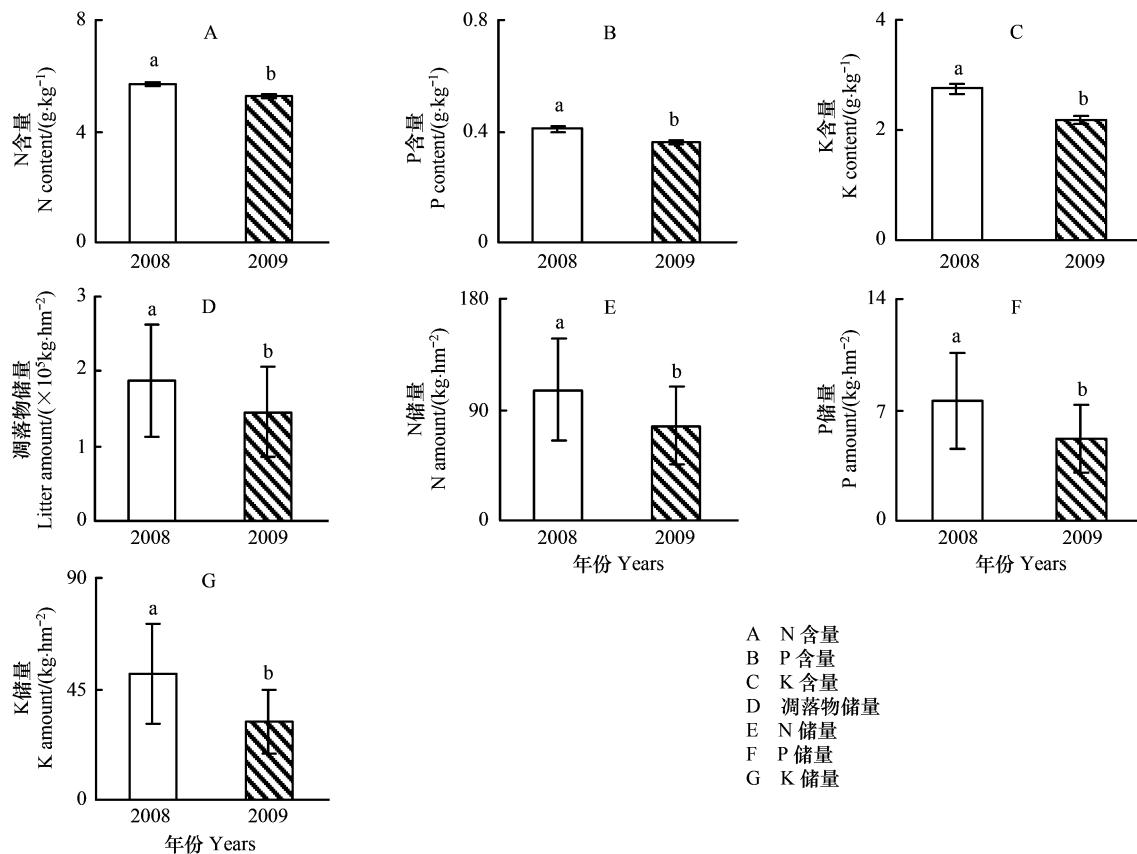


图1 凋落物的养分

Fig. 1 Litter nutrients

的场所,生理代谢活动旺盛,N、P 和 K 含量自然居各组分之首^[27],造成 2008 年的凋落物的 N、P 和 K 含量较高。凋落物经过 1a 的分解后,N、P 和 K 含量由于流失而分别下降了 7%、12% 和 21%。

由于 2009 年的凋落物储量显著减少了 22% ($P < 0.05$),N、P 和 K 含量也有所下降,使得其 N、P 和 K 的储量分别显著下降了 27%、31% 和 38% ($P < 0.05$),3 种养分的总储量有 2008 年的 $165.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 下降到 2009 年的 $113.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

2.2 树干残体的养分变化

N 和 P 属于不易流失的养分,在 2009 年树干残体的 N 和 P 含量分别上升 5% 和 6%,而 K 因为容易受到降水淋洗而流失,其含量显著降低 15% ($P < 0.01$) 树干残体的储量仅下降 3% (图 2)。

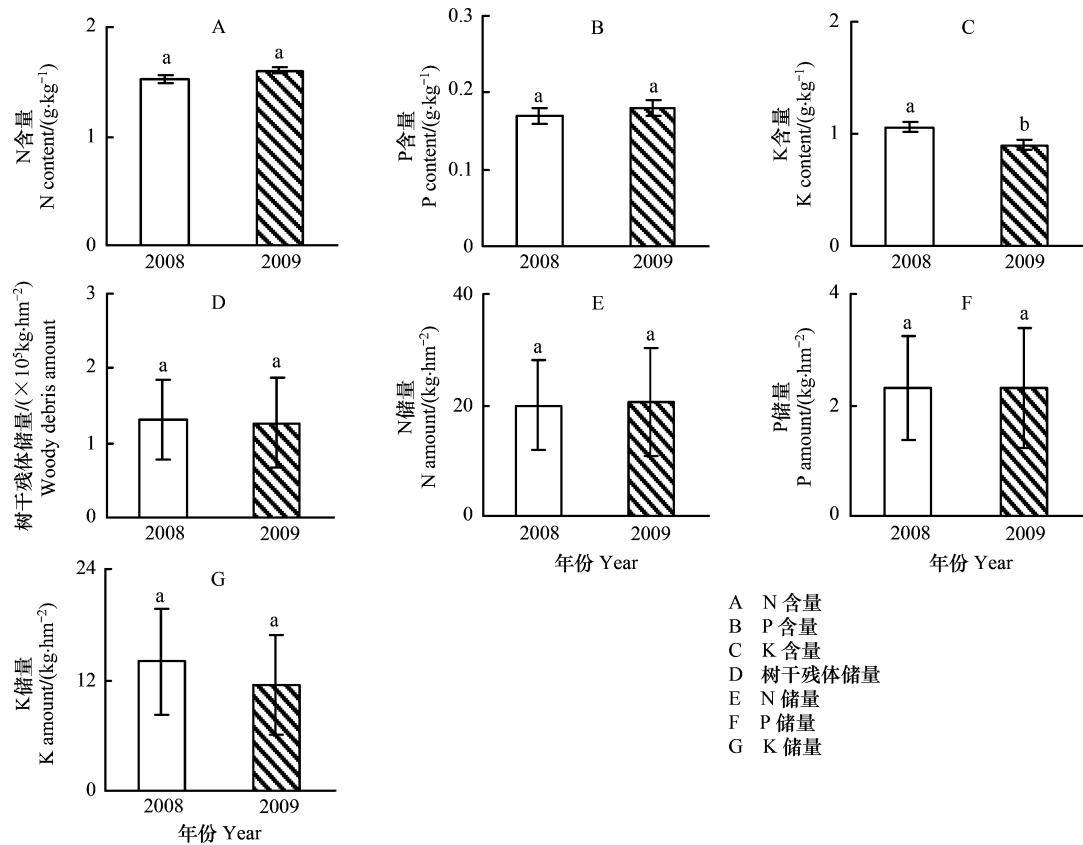


图 2 树干残体的养分

Fig. 2 Nutrients of woody debris

2009 年由于树干残体的储量的下降幅度小,N 和 P 含量的小幅增加,使 N 储量增加了 2%,P 的储量不变,而 K 的储量下降了 18%,3 种养分的总储量下降了 11%。树干残体的缓慢分解及 N 和 P 的缓慢释放有利于保持林地的养分。

2.3 土壤物理性质

与 2008 年相比,2009 年的土壤容重和毛管孔隙度减小,总空隙度和毛管持水量增加,非毛管孔隙显著增加(图 3)。说明冰雪灾害后森林凋落物增多,积累于地表,腐烂后形成较厚的腐质层,土壤结构变得疏松,所以非毛管孔隙发达,通气性好。毛管孔隙度受毛管持水量和土壤容重的共同影响。虽然 2009 年的毛管持水量增加了 12%,但是土壤容重下降了 14%,所以毛管孔隙度减小 5%。总体来看,2009 年土壤较为疏松,通气性好,水分条件较好。冰雪灾害造成的大量凋落物随着时间推移慢慢分解,增加了腐殖质,改善了土壤结构。

2.4 土壤化学性质

各样地土壤 pH 呈强酸性。与 2008 年相比,2009 年的样地土壤 pH 显著下降 ($P < 0.05$) (图 4a)。冰雪

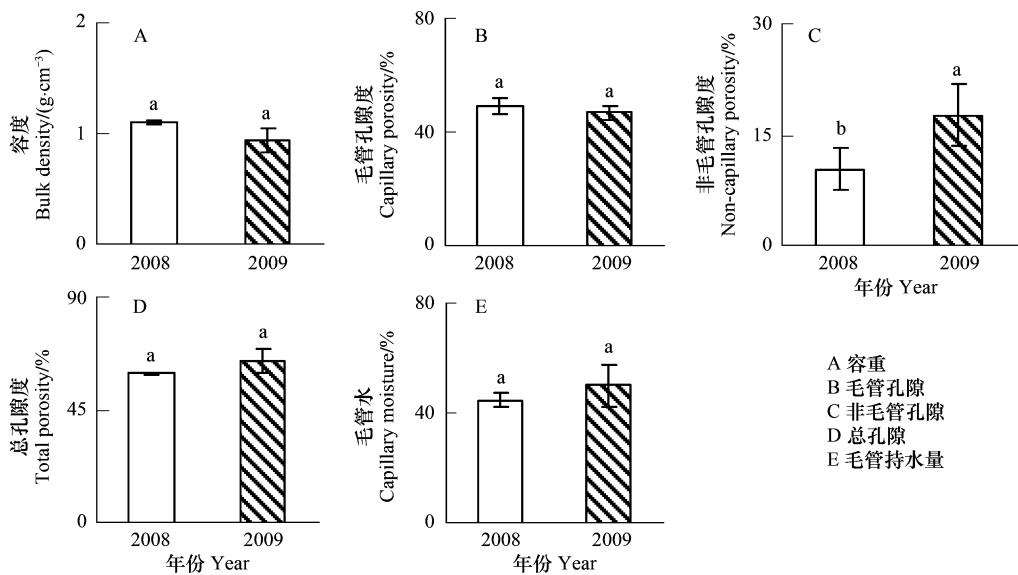


图3 土壤物理性质

Fig. 3 Soil physical properties

灾害引起的林冠层破坏产生了大量的凋落物,并造成林地光照增强,使凋落物分解加速,产生大量酸性物质,引起土壤pH降低。

与2008年相比,2009年的土壤有机质含量显著上升了16% ($P < 0.01$) (图4b),这是因为土壤有机质含量受凋落物的状况影响。冰雪灾害后林地的光照增强,地表温度升高,微生物活动旺盛,有利于枝叶残体和凋落物的分解及有机质的矿化作用,加上枝叶残体的有机质向下淋洗,促进了有机质含量的增加。

2009年土壤全N、全P和全K含量均显著增加($P < 0.05$) (图4c—e),增幅分别为11%、14%和8%。冰雪灾害后大量的林冠残体覆盖林地,林冠层的消失引起林地裸露,太阳辐射可以直达地表,气温和土温都升高,有利于林冠残体和凋落物迅速分解,致使矿化速率加快,促进向林地归还养分,提高了土壤养分含量。

林木的由于折干而生长减弱,吸收养分能力下降,减少了养分的消耗。裸露林地的土壤水热条件促进了微生物的繁衍,酶活性增强,林冠残体和凋落物分解加快,加速土壤有机态氮的转化,将土壤迟效态的氮转为速效态的氮,引起 P_2O_5 含量相对增加,使2009年碱解N和速效P含量分别显著增加113%和17% ($P < 0.01$) (图4f—h)。K容易受到雨水的淋溶而流失,其含量显著下降了36%。

3 讨论

3.1 凋落物的养分变化

由林冠残体带来的大量养分输入林地能影响养分的循环。2008年枝叶残体和树干残体输入林地的N、P、K重量分别为106.1、7.6、51.4 kg·hm⁻²,分别是当年凋落物层的N、P、K重量的2.0、3.3、4.9倍。冰雪灾害造成的林冠折损引起林地的太阳辐射水平提高。太阳辐射,特别是紫外光增加凋落物的分解速度^[28-30]。光照增强引起的温度上升及增加土壤水分能促进凋落物的分解^[31-32]。大量的林冠残体在温度高和降雨量大的中亚热带会快速分解,可能造成养分的流失。尽管N和P是不易流失养分^[33],林冠残体中绿叶分解可能比正常凋落叶快,会造成N和P的损失。Xu等^[34]报道,台风吹落的绿叶的分解速度比正常的凋落叶快,加快了N和P的流失,引起土壤中速效N和P含量的增加。原因是从新鲜绿叶中快速释放的养分可能超过生态系统中树木和微生物的需求和土壤的容纳能力,在降雨量大的情况下尤其如此^[35]。K是易移动的养分,很快从凋落叶中释放,也容易被雨水淋洗而损失^[36]。以上原因造成2009年的凋落物的N、P和K的储量比前一年分别下降了27%、31%和38%。由此可见,冰雪灾害加速了养分的循环。

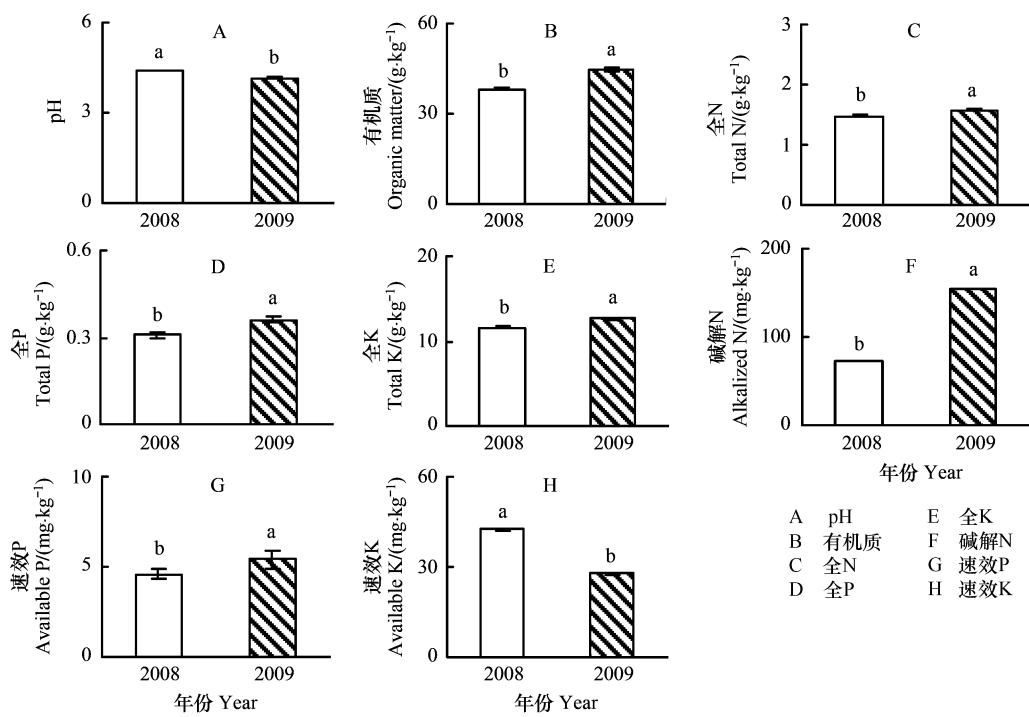


图 4 土壤化学性质

Fig. 4 Soil chemical properties

3.2 树干残体的养分变化

树干残体的分解受到水分、温度、微生物活性和植物残体本身的质量等因素的影响,显得较为复杂。树干残体的分解缓慢,其储量仅下降3%,这与树皮关系密切。树干残体的树皮含有高浓度的丹宁酸和木质素^[37],而丹宁酸和木质素限制微生物的活动,因而阻碍树干残体的分解^[38]。树皮中高浓度的多酚和烷基也是分解缓慢的重要影响因素^[37]。另外,杉木树干残体的N含量低,导致其C/N比高,这也可能导致其分解速度较慢^[39]。在分解初期,尽管雨水的淋洗会造成树干残体的养分流失,但是N和P不易流失,另外微生物在树干残体的积累可导致N和P含量增加^[40],引起了N和P含量的小幅增加。K是一种极易移动的养分^[41],特别是在降雨充沛和气候温暖的条件下养分会加速淋失和释放^[37]。所以树干残体分解1a后K的含量减少,这与其他研究者的结果一致^[37,41-42]。

树干残体的缓慢分解及N和P的缓慢释放有利于保持林地的养分。因为枝叶残体分解快,短期内养分大量释放,土壤养分供过于求,容易造成流失。树干残体的养分缓慢释放到土壤中后,储存于土壤有机质中,维持了森林土壤肥力,有利于在杉木林在整个恢复生长过程中的养分供应。

3.3 土壤物理性质

土壤容重大能降低土壤水分、孔隙度和养分的可利用性^[43-44],增加养分的流失^[45],对于微生物、N的矿化和硝化作用有不利影响^[46]。2009年,大量的枝叶残体输入土壤后,在分解过程中产生的土壤矿质颗粒和有机质有利于团聚体的形成,导致了土壤非毛管孔隙的显著增加。另外,由于树干残体的存在,土壤中动物和微生物的数量增加,其活跃的活动形成了大量纵横交错的土壤水分通道,增加了土壤的孔隙度和透水性^[47]。土壤有机质和非毛管孔隙的增加造成了土壤持水能力增强和容重减少。大量林冠残体存在地表,可以使地表温度和土壤湿度的波动趋于缓和,改善了微生物的生存环境。这些因素促进了凋落物的分解。

3.4 土壤化学性质

冰雪灾害引起土壤碱解N和速效P含量的增加,表明枝叶残体和树干残体分解释放的N和P进入了土壤有机质。生态系统遭受冰雪灾害后,大量养分从活树转移到枝叶残体和树干残体上,起到养分贮存的作用。

用。冰雪灾害后大量的林冠残体覆盖林地,林冠层的消失引起林地裸露,太阳辐射可以直达地表,气温和土温都升高,促进了微生物的繁衍,酶活性增强,林冠残体和凋落物分解加快,有利于枝叶残体和凋落物的分解及有机质的矿化作用,促进向林地归还养分,枝叶残体和粗木质残体分解释放的养分逐步转移到土壤中,使林内土壤的腐殖质和N、P、K含量增加,构成土壤与树木间的物质循环。与枝叶残体相比,粗木质残体的养分浓度一般较低,养分释放速率慢^[48],归还林地的养分少,因此土壤有机质的增加主要枝叶残体是分解造成的^[49]。但粗木质残体不像枝叶残体那样容易遭受雨水淋溶损失,因而在高温多雨的南亚热带森林发挥着养分保持的重要功能。林地2009年的非毛管孔隙度和土壤毛管持水量的增大,光照增强引起土壤温度上升,加快了有机态N的转化,使碱解N显著增加。林木受损伤后枝叶很少,光合作用急剧下降导致对土壤养分能力的需求下降也是土壤碱解N积聚增加的重要原因。由于酸性土壤中氧化铁、铝含量高,大量的P与铁和氧化铝结合在一起,短期内无法被植物吸收利用^[50],使得速效P的增幅远远小于碱解N。枝叶残体和树干残体的分解能增加速效K含量,但是K容易受到雨水的淋溶,使2009年土壤的速效K含量出现下降。

由上可知,雨雪冰冻灾害促进了凋落物和树干残体的分解和养分释放。冰雪灾害后森林凋落物积累于地表使得土壤变得疏松,非毛管孔隙和毛管持水量增加。凋落物和树干残体在分解过程中促进了土壤有机质和养分的积累,土壤有机质、全N、全P和全K、碱解N和速效P含量均大幅增加,而速效K含量由于雨水淋洗而下降。

References:

- [1] Bruderle L P, Stearns F W. Ice storm damage to a Southern Wisconsin mesic forest. *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, 1985, 112: 167-175.
- [2] Melacon S, Lechowicz M J. Differences in the damage caused by glaze ice on codominant *Acer saccharum* and *Fagus grandifolia*. *Canadian Journal of Botany*, 1986, 65: 1157-1159.
- [3] De Stevens D, Kline J, Kline M, Paul E. Long-term changes in a Wisconsin *Fagus-Acer* forest in relation to glaze storm disturbance. *Journal of Vegetation Science*, 1991, 2: 208-210.
- [4] Seischab F K, Bernard J M, Eberle M D. Glaze storm damage to Western New York forest communities. *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, 1993, 120: 64-72.
- [5] Rebertus A J, Shifley S R, Richards R H, Roovers L M. Ice storm damage to an old-growth oak-hickory forest in Missouri. *American Midland Naturalist*, 1997, 137: 48-61.
- [6] Mou P, Warrillow M P. Ice storm damage to a mixed hardwood forest and its impacts on forest regeneration in the ridge and valley region of Southwestern Virginia. *Journal of the Torrey Botanical Society*, 2000, 127: 66-82.
- [7] Smolnik M, Hessl A, Colbert J J. Species-specific effects of a 1994 ice storm on radial tree growth in Delaware. *The Journal of the Torrey Botanical Society*, 2006, 133: 577-584.
- [8] Li X F, Zhu J J, Wang Q L, Liu Z G, Hou C S, Yang H J. Snow/wind induced damage in natural secondary forests in Liaodong mountainous regions, Liaoning Province. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15 (6): 941-946.
- [9] Li X F, Zhu J J, Wang Q L, Liu Z G, Mo Z H. Relationships between snow/wind damage and tree species as well as forest types in secondary forests. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28 (4): 28-33.
- [10] Zhu J J, Li X F, Liu Z G, Gao W, Gonda Y, Matsuzaki T. Factors affecting the snow and wind induced damage of a mountain secondary forest in northeastern China. *Silva Fennica*, 2006, 40 (1): 37-51.
- [11] Xu J M, Li G Y, Lu Z H, Xiang D Y, Zeng B S, Zhang N N, Gu H Y. Investigation on eucalypt forest plantations subjected to the freezing catastrophe in Southern China. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44 (7): 103-110.
- [12] Tang J M, Song C W, Dai J H, Liu H G, Zheng X Y. Investigation on the frozen snow damage of main afforestation tree species in Hubei Province. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(11): 2-10.
- [13] Zhao X, Shen X Q, Huang S N, Luo X H, Luop T S, Zeng F Z, Zhang N, Yu W S, Xiao Y H, Wang X. Mechanical damages to woody plants from a snow disaster in Yangdongshan Shierdushui Provincial Nature Reserve. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(11): 164-167.
- [14] Xu Y Z, Sun X M, Song C W, Du C Q, Chen B R, Zhang D Q. Damage of sub-alpine *Larix kaempferi* plantation induced by snow storm in Western Hubei. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(11): 11-17.
- [15] Zhang J G, Duan A G, Tong S Z, Sun H G, Deng Z F, Zhang S G. Harm of frost and snow suppress to near mature stands of *Cunninghamia lanceolata* plantations. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(11): 18-22.

- [16] Luo T S, Zhang G P, Wu Z M, Wong Q J, Luo X H, Zhang N, Xiao Y H, Zeng F Z, Wang X, Yu W S, Zhao X. Effects of the frozen Rain and snow disaster to the litterfall of evergreen and deciduous broadleaved mixed forest in Yanglongshan Shierdushui Nature Reserve of Guangdong. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(11):177-183.
- [17] Xue L, Feng H F, Zheng W G, Fu J D, Cao H. Water capacity characteristic of the broken crown and litter in a *Cunninghamia lanceolata* stand suffered from ice-snow damage in North Guangdong Province. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(11):82-86.
- [18] Tian D L, Gao S C, Kang W X, Yan W D, Xiang W H, Fang X. Impact of freezing disaster on nutrient content in a *Koelreuteria paniculata* and *Elaeocarpus decipens* mixed forest ecosystem. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(11):115-122.
- [19] Liao J H, Wang H H, Tsai C C, Hsue Z Y. Litter production, decomposition and nutrient return of uplifted coral reef tropical forest. *Forest Ecology and Management*, 2006, 235: 174-185.
- [20] Nagler P L, Daughtry C S T, Goward S N. Plant Litter and Soil Reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 71:207-215.
- [21] Mo J M, Brown S, Peng S L, Kong G H. Nitrogen availability in disturbed, rehabilitated and mature forests of tropical China. *Forest Ecology and Management*, 2003, 175:573-583.
- [22] Ruf A, Kuzyakov Y, Lopatovskaya O. Carbon fluxes in soil food webs of increasing complexity revealed by ^{14}C labelling and ^{13}C natural abundance. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38:2390-2400.
- [23] Barber B L, Vanlear D H. Weight loss and nutrient dynamics in decomposing woody loblolly pine logging slash. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48: 906-910.
- [24] Li L H, Wang Q B, Xing X R. Advances in the research of some important issues concerning forest ecosystems. *Chinese Bulletin of Botany*, 1998, 15 (1):17-26.
- [25] Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. *The Physical and Chemical Analysis of Soil*. Shanghai: Shanghai Sciences and Technology Press. 1978: 62-375.
- [26] Wu Z M, Li Y D, Zhou G Y, Chen B F. Abnormal litterfall and its ecological significance. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(11):28-31.
- [27] Xue L. Nutrient cycling in a Chinese-fir (*Cunninghamia lanceolata*) stand on a poor site in Yishan, Guangxi. *Forest Ecology and Management*, 1996, 89: 115-123.
- [28] Austin A T, Vivanco L. Plant litter decomposition in a semi-arid ecosystem controlled by photodegradation. *Nature*, 2006, 442: 555-558.
- [29] Brandt L A, King J Y, Milchunas D G. Effects of UV radiation on decomposition depend on precipitation and litter chemistry in a shortgrass steppe ecosystem. *Global Change Biology*, 2007, 13: 2193-2205.
- [30] Day T A, Zhang E T, Ruhland C T. Exposure to solar UV-B radiation accelerates mass and lignin loss of *Larrea tridentata* litter in the Sonoran Desert. *Plant Ecology*, 2007, 193: 185-194.
- [31] Vitousek P M. Beyond global warming: ecology and global change. *Ecology*, 1994, 175: 1861-1876.
- [32] Hungate B A, Dijkstra P, Johnson D W, Hinkle C, Drake B G. Elevated CO_2 increases nitrogen fixation and decreases soil nitrogen mineralization in Florida scrub oak. *Global Change Biology*, 1999, 5: 797-806.
- [33] Vitousek P M, Denslow J S. Nitrogen and phosphorus availability in treefall gaps of a lowland tropical rainforest. *Journal of Ecology*, 1986, 74: 1167-1178.
- [34] Xu X, Hirata E, Enoki T, Rees R, Hell U, Matzner E. Leaf litter decomposition and nutrient dynamics in a subtropical forest after typhoon disturbance. *Plant Ecology*, 2004, 173: 161-170.
- [35] Chang S C, Wang C P, Feng C M, Rees R, Hell U, Matzner E. Soil fluxes of mineral elements and dissolved organic matter following manipulation of leaf litter input in a Taiwan Chamaecyparis forest. *Forest Ecology and Management*, 2007, 242: 133-141.
- [36] Rees R, Chang S C, Wang C P, Matzner E. Release of nutrients and dissolved organic carbon during decomposition of *Chamaecyparis obtuse* var. *formosana* leaves in a mountain forest in Taiwan. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2006, 169: 792-798.
- [37] Ganjegunte G K, Condon L M, Clinton P W, Davis M R, Mahieu N. Decomposition and nutrient release from radiata pine (*Pinus radiata*) coarse woody debris. *Forest Ecology and Management*, 2004, 187: 197-211.
- [38] Baldock J A, Sewell T, Hatcher P G. Decomposition induced changes in the chemical structure of fallen red pine, white spruce and Tamarack logs // Cadisch G, Giller K E eds. *Driven by Nature: Plant Litter Quality and Decomposition*. CAB International, Wallingford, 1997.
- [39] Blumfield T J, Xu Z H, Mathers N J, Saffigna P G. Decomposition of post-harvest, ^{15}N -labelled hoop pine residues in subtropical Australia. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68: 1751-1761.
- [40] Busse M D. Downed bole-wood decomposition in lodgepole pine forests of central Oregon. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58: 221-227.
- [41] Preston C M, Trofymow J A, Niu J, Fyfe C A. ^{13}C PMAS-NMR spectroscopy and chemical analysis of coarse woody debris in coastal forests of Vancouver Island. *Forest Ecology and Management*, 1998, 111: 51-68.

- [42] Kruskina O K, Harmon M E, Griazkin A V. Nutrient stores and dynamics of woody detritus in a boreal forest: modelling potential implications at the stand level. *Canadian Journal of Forest Research*, 1999, 29: 20-32.
- [43] Mapfumo E, Chanasyk D S, Naeth M A, Baron V S. Forage growth and yield components as influenced by subsurface compaction. *Agronomy Journal*, 1998, 90: 805-812.
- [44] Arcocena J M. Cations in solution from forest soils subjected to forest floor removal and compaction treatments. *Forest Ecology and Management*, 2000, 133: 71-80.
- [45] Soane B D, van Ouwerkerk C. Implications of soil compaction in crop production for the quality of the environment. *Soil & Tillage Research*, 1995, 35: 5-22.
- [46] Tan X, Chang S X. Soil compaction and forest litter amendment affect carbon and net nitrogen mineralization in a boreal forest soil. *Soil & Tillage Research*, 2007, 93: 77-86.
- [47] Franklin J F. Tree death as an ecological process. *Bioscience*, 1987, 37: 550-556.
- [48] Harmon M E. Ecology of coarse woody debris in Temperate Ecosystem. *Advance in Ecological Research*, 1986, 15: 133-176.
- [49] Martin W K E, Timmer V R. Capturing spatial variability of soil and litter properties in a forest stand by landform segmentation procedures. *Geoderma*, 2006, 132: 169-181.
- [50] Dias-Filho M B, Davidson E A, de Carvalho C J R. Pastures// McClain M E, Victoris R L, Richey J E, eds. *The Biogeochemistry of the Amazon Basin*. Oxford University Press, New York, 2001.

参考文献：

- [8] 李秀芬, 朱教君, 王庆礼, 刘足根, 侯传生, 杨焕君. 辽东山区天然次生林雪/风灾害成因及分析. *应用生态学报*, 2004, 15 (6): 941-946.
- [9] 李秀芬, 朱教君, 王庆礼, 刘足根, 毛志宏. 次生林雪 P 风害干扰与树种及林型的关系. *北京林业大学学报*, 2006, 28 (4): 28-33.
- [11] 徐建民, 李光友, 陆利华, 项东云, 曾炳山, 张宁南, 郭洪英. 南方桉树人工林雨雪冰冻灾害调查分析. *林业科学*, 2008, 44 (7): 103-110.
- [12] 汤景明, 宋从文, 戴均华, 刘恒贵, 郑孝严. 湖北省主要造林树种冰雪灾害调查. *林业科学*, 2008, 44(11): 2-10.
- [13] 赵霞, 沈孝清, 黄世能, 罗鑫华, 骆土寿, 曾繁助, 张娜, 余伟盛, 肖以华, 王旭. 冰雪灾害对杨东山十二度水自然保护区木本植物机械损伤的初步调查. *林业科学*, 2008, 44(11): 164-167.
- [14] 许业洲, 孙晓梅, 宋从文, 杜超群, 陈柏如, 章定清. 鄂西亚高山日本落叶松人工林雪灾调查. *林业科学*, 2008, 44(11): 11-17.
- [15] 张建国, 段爱国, 童书振, 孙洪刚, 邓宗富, 张守攻. 冰冻雪压对杉木人工林近成熟林分危害调查. *林业科学*, 2008, 44(11): 18-22.
- [16] 骆土寿, 张国平, 吴仲民, 翁启杰, 罗鑫华, 张娜, 肖以华, 曾繁助, 王旭, 余伟盛, 赵霞. 雨雪冰冻灾害对广东杨东山十二度水保护区常绿与落叶混交林凋落物的影响. *林业科学*, 2008, 44(11): 177-183.
- [17] 薛立, 冯慧芳, 郑卫国, 傅静丹, 曹鹤. 冰雪灾害后粤北杉木林冠残体和凋落物的持水特性. *林业科学*, 2008, 44(11): 82-86.
- [18] 田大伦, 高述超, 康文星, 同文德, 项文化, 方晰. 冰冻灾害前后矿区废弃地栾树杜英混交林生态系统养分含量的比较. *林业科学*, 2008, 44(11): 115-122.
- [24] 李凌浩, 王其兵, 邢雪荣. 森林生态系统研究中几个重要方面的进展. *植物学通报*, 1998, 15 (1): 17-26
- [25] 中国科学院南京土壤研究所. *土壤理化分析*. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 62-375.
- [26] 吴仲民, 李意德, 周光益, 陈步峰. “非正常凋落物”及其生态学意义. *林业科学*, 2008, 44(11): 28-31.