

# 我国落叶松人工林地力衰退与施肥研究综述\*

白小芳<sup>1,2</sup> 徐福利<sup>1,3</sup> 王渭玲<sup>3</sup>

(1 中国科学院水利部水土保持研究所 陕西杨凌 712100; 2 中国科学院大学 北京 100049;

3 西北农林科技大学, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 落叶松是我国栽种区域最广的针叶树种。落叶松人工林的发展,对我国人工林的发展至关重要。文中论述了我国落叶松人工林地的土壤物理性状、土壤化学性状和生物学性状,分析了落叶松人工林地力衰退的研究现状并重点对落叶松人工林的施肥时期、施肥方法、施肥种类和用量以及施肥效应进行了归纳总结,旨在为落叶松人工林的可持续发展以及营养管理研究和集约经营研究提供参考。

**关键词:** 落叶松, 人工林, 林地施肥, 地力衰退, 中国

中图分类号: S727.1, S753.532

文献标识码: A

文章编号: 1001-4241(2016)01-0075-05

DOI: 10.13348/j.cnki.sjlyyj.2016.01.009

## Research Advance on Soil Degradation and Fertilization of Larch Plantations in China

Bai Xiaofang<sup>1,2</sup> Xu Fuli<sup>1,3</sup> Wang Weiling<sup>3</sup>

(1 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources,

Yangling 712100, Shaanxi, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3 Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

**Abstract:** Larch is the most widely planted coniferous species in China. The development of larch plantations is very important to the development of plantations of China. This paper summarized the soil physical properties, soil chemical properties, biological properties of larch plantations, analyzed the current research on the soil degradation of larch plantation, and concluded and generated the time, method, type and dosage and effect of fertilization, in order to provide the scientific references for the sustainable management of larch plantation as well as for the study of nutrient management and intensive management.

**Key words:** larch, plantation, fertilization, soil degradation

落叶松(*Larix* spp.)是松科落叶松属落叶乔木,在我国自然分布于东北、内蒙古以及华北、西南高山区<sup>[1]</sup>。由于其耐寒喜光、生长快、木材结构细致、抗腐蚀性强等特点,成为我国北方主要的造林和速生丰产树种<sup>[2-3]</sup>。根据我国第8次森林资源清查结果统计,我国人工林面积为0.69亿hm<sup>2</sup>,居世界第1位,落叶松人工林作为北方重要的人工林之一,成为我国重要的后备森林资源。

随着落叶松人工林的大力发展,大面积营造落叶松人工纯林的弊端逐渐显现出来,落叶松人工林出现生长缓慢、地力衰退、造林密度大、树种单一、林下植被发育差、病虫害严重等问题<sup>[4-5]</sup>。这些问题严重影响到落叶松人工林的可持续经营和生态效益的发挥。研究表明,合理施肥可以有效提高人工林土壤养分<sup>[6-7]</sup>,进而缓减和控制人工林地力衰退,提高人工林生产力<sup>[8-9]</sup>。林木施肥已经成为管理和培育速生

\* 收稿日期: 2015-06-30; 修回日期: 2015-09-02。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2012CB416902)。

作者简介: 白小芳(1990-),女,陕西榆林人,硕士研究生,主要从事生态环境研究, E-mail: baixiaofang999@163.com。

通信作者: 徐福利(1958-),男,陕西富平人,研究员,主要从事植物营养学、环境生态与农业可持续的水肥管理研究, E-mail: xfl@nwsuaf.edu.cn。

丰产林的一项必不可少的措施<sup>[10-12]</sup>。目前我国学者在落叶松施肥方面作了一些研究。本文主要对我国落叶松人工林地力衰退和施肥研究进行归纳总结,希望能为落叶松人工林的健康发展和可持续经营提供参考。

## 1 落叶松人工林地力衰退研究

人工林地力衰退是一个世界性的问题,德国和瑞士的科学家最早在19世纪对第2代云杉人工林调查时发现了人工林生产力的下降<sup>[13]</sup>。直到20世纪人工林地力衰退现象受到国内外学者的广泛关注<sup>[14-15]</sup>。我国学者从20世纪80年代开始研究落叶松人工林地力衰退问题。落叶松人工林地力衰退主要表现在以下几个方面。

### 1.1 土壤物理性质变差

落叶松人工林对土壤物理性质有不良的影响。王秀石<sup>[16]</sup>研究表明,与天然阔叶次生林相比,落叶松人工林的土壤容重变大,土壤总孔隙度降低,供排水性能降低。陈喜全等<sup>[17]</sup>对落叶松人工纯林和落叶松胡桃楸混交林对比研究发现,纯林土壤含水量、容重、持水量等指标均低于混交林,由此说明落叶松人工纯林的土壤物理肥力有相对衰退的趋势。还有一些研究<sup>[18-19]</sup>也支持落叶松人工林对土壤物理性质有不良影响的观点。

### 1.2 土壤养分含量下降

闫德仁等<sup>[20]</sup>研究表明,落叶松纯林与对照样地相比,土壤有机质、全N、全P、全K含量分别下降30.05%、18.75%、4.45%和21.5%,速效性养分除P外,N和K的含量也以落叶松纯林为低。王新宇等<sup>[21]</sup>对落叶松人工林与水曲柳纯林及其混交林和天然林比较研究发现,落叶松纯林土壤上层(0~10 cm)有机质、全N、全P含量均显著低于其他林分,落叶松纯林各层土壤水解N含量显著低于其他林分。还有学者对不同发育阶段、不同栽植代数的落叶松人工林研究认为,由于落叶松人工林凋落物组分分解缓慢,养分吸收与实际归还量不协调,导致人工林土壤养分含量下降<sup>[22-25]</sup>。

### 1.3 土壤生物学性质变化

营造落叶松人工纯林会降低土壤微生物含量和酶活性,并且随着林龄的增加而进一步恶化。闫德仁等<sup>[26]</sup>研究表明,10年生落叶松纯林0~20 cm土层微生物总量、细菌和放线菌含量分别平均下降

84.45%、85.55%和59.70%,18年生落叶松纯林则进一步下降。吉艳芝等<sup>[27]</sup>研究发现,落叶松水曲柳混交林根际与非根际土的微生物总量高于落叶松纯林,混交林根际土和非根际土的过氧化氢酶、蛋白酶和多酚氧化酶活性分别高于纯林84.1%、9.7%、126.4%和53.4%、15.1%、125.8%。孙翠玲等<sup>[28]</sup>通过对日本落叶松重茬林地研究表明,一茬林地土壤中细菌、真菌、放线菌均高于二茬林地,且土壤养分含量也远大于二茬林地,表明落叶松的连栽会降低土壤养分含量,进而影响土壤的生态性质。

### 1.4 生产力下降

落叶松人工林地力衰退最直接的体现就是生产力下降。陈乃全等<sup>[29]</sup>对长白落叶松人工林重茬更新效果研究表明,二代林产量比一代林下降15.1%,在相似立地或同一块林地条件下,二代林生长下降的趋势都很明显,且立地条件越差二代林生长速率下降越快。陈立新<sup>[30]</sup>研究也表明,与天然次生林相比,落叶松人工林林下植被生物量幼龄林、中龄林、近成熟林和成熟林分别降低75.79%、88.14%、50.73%和62.71%;二代落叶松人工幼龄林与一代相比,平均优势木地上部分生物量和地下部分生物量分别降低71.74%和86.12%。

## 2 落叶松人工林施肥技术研究

林木施肥最早出现于18世纪<sup>[31]</sup>,我国对落叶松人工林施肥研究开始于20世纪80年代。关于落叶松人工林施肥的研究并不多,也未见综述性文献,下面将集成前人研究并结合目前落叶松人工林培育管理的发展趋势,对落叶松人工林的施肥种类、施肥方法以及施肥效应等进行归纳和总结。

### 2.1 施肥时期

落叶松整个生育期施肥包括苗木期施肥、幼龄林施肥、中龄林施肥、近成熟林施肥和成熟林施肥。不同发育阶段落叶松对养分的需求不同,施肥效果也不相同,在苗木期和幼龄林期的施肥效果显著<sup>[32]</sup>。对落叶松近成熟林施N肥效果最明显,材积增长量最大<sup>[33]</sup>。吉艳芝<sup>[34]</sup>通过对不同发育阶段落叶松人工林的施肥试验发现,对幼龄林和近成熟林混施N、P和K肥能够较好地改善土壤物理性质;幼龄林需要大量的养分,近成熟林需要一定量的N和P肥。在落叶松的整个生长季都可以进行施肥,施肥的最佳时

期一般在树木生长高峰期前<sup>[35]</sup>。具体施肥时间根据落叶松分布地域而定,一般在4月中旬到6月初施肥效果较为理想。

## 2.2 施肥方式和方法

落叶松人工林施肥一般有基肥和追肥2种方式。基肥在造林前或造林时施入。追肥则可以在人工林发育的不同时期根据需要进行,又分为撒施、条施、沟施、穴施和根外追肥等方法<sup>[36]</sup>。不同的追肥方法会影响到施肥效果,但是目前我国在这方面的研究较少。落叶松人工林施肥比较常用的是环状沟施、穴施以及撒施。对兴安落叶松成熟林施肥研究表明,穴施与撒施相比可以提高材积生长量10%左右,但是方差分析差异不显著,这是因为穴施可以减少肥料的浪费与淋失<sup>[35]</sup>。施肥时应该根据施肥面积、人力和物力以及林区自然条件等来确定具体的施肥方法。

## 2.3 肥料种类与用量

我国落叶松人工林的肥料种类大多是化学肥料,以N肥、P肥、K肥以及复合肥为主。N肥主要有尿素和硝酸铵,P肥主要是过磷酸钙,K肥为氯化钾和硫酸钾,复合肥有硫酸二胺、磷酸二氢钾等。也有一些施用有机肥料(如草炭灰、厩肥)和生物肥料(如菌肥)。不同的肥料种类、施肥组合以及肥料用量其施肥效果会不相同。例如,日本落叶松幼树施用菌肥对树高生长的促进作用明显好于厩肥,其原因在于施用菌肥后起到了接种落叶松菌根的作用,增强了幼树对养分的吸收能力,同时菌根分泌的酶也能刺激根部发育,从而促进幼树生长<sup>[37]</sup>。吉艳芝<sup>[38]</sup>认为,有机肥与化肥混施是提高林地土壤可持续性指数的最好施肥方式。吴耀先<sup>[39]</sup>认为,不同的施肥量对长白落叶松人工中幼龄林的叶养分含量有一定的影响,在一定范围内随着施肥量的增高,叶中含氮和磷成分呈上升趋势,胸径和树高生长量也相应增高。陈立新<sup>[40]</sup>研究表明,从土壤微生物活性来看,14年生的幼龄林需要大量的N肥,施P肥效果不明显,施肥量以N肥200 kg/hm<sup>2</sup>、P肥120 kg/hm<sup>2</sup>、K肥80 kg/hm<sup>2</sup>、有机肥3 000 kg/hm<sup>2</sup>的效果最佳。目前,对施肥量和施肥种类还没有具体的标准,需要根据施肥目的、林分发育阶段、土壤肥力等不同而选择适宜的肥料种类和用量。

## 2.4 施肥效应分析

### 2.4.1 对林木生长和林分产量的影响

施肥能够显著促进落叶松人工林树高、胸径、冠

幅和材积的生长,提高林分的生产量<sup>[35,41-42]</sup>。姜国斌<sup>[43]</sup>对中幼龄落叶松施肥研究表明,幼龄林施N肥0.75 kg/株,平均胸径可增加3.41%;施氮磷混合肥0.8 kg/株,平均胸径可提高1.08%;对胸径和单株材积进行协方差分析表明,施肥增加了木材和整个林地的生物量。易咏梅<sup>[44]</sup>通过对日本落叶松幼龄林施肥研究表明,复合肥可以使落叶松的地径、树高和冠幅生长量分别提高13%~18%,10%~15%和3%~15%。

### 2.4.2 对林木养分和生理活性的影响

植物所需要的养分主要来自于土壤,土壤养分的供给能力直接反映植物的根茎叶养分含量。施肥可以提高土壤养分含量,从而提高根、茎、叶中的养分含量。对20年生华北落叶松人工林施肥研究表明,施N肥和P肥可明显提高华北落叶松根、茎、叶中的N和P含量<sup>[45]</sup>。赵琼等<sup>[46]</sup>对兴安落叶松林施N肥表明,N的添加显著提高了根系、树枝和树干中N和P的含量。合理施肥能提高1年生和14年生落叶松人工林叶片与根系的养分质量分数和叶片的光合能力<sup>[47]</sup>。施肥还能够改变落叶松的根系形态、养分含量,并影响其生理功能<sup>[48]</sup>。研究表明<sup>[49-50]</sup>,施肥对落叶松细根系的平均长度、平均表面积、平均直径和平均比根长都有影响,只是不同根序的影响程度不同。影响主要表现在1~2级根系上。于立忠<sup>[51]</sup>研究表明,施N肥和P肥显著增加了1~4级根的N、P和非结构性碳水化合物(TNC)浓度。同时施肥能够显著提高落叶松根系呼吸速率和根系保护酶活性<sup>[52]</sup>。

### 2.4.3 施肥对土壤理化性质的影响

施肥能够提高落叶松人工林地的养分含量,改善土壤理化性质。施肥可以增加土壤容重,减少土壤的总孔隙度,其影响大小根据施肥量和林龄有所不同;施肥对林地土壤pH值也有影响,对幼林地(1年生)和幼龄林(14年生)的土壤酸度影响较小,对近成熟林(34年生)的土壤酸度影响较大<sup>[34]</sup>。张潘<sup>[53]</sup>对20年生华北落叶松研究表明,施肥会导致土壤酸化,但是随着肥效减弱土壤酸化效果逐渐缓减。施肥后根际土与非根际土的有机质、全N、全P含量也相对增加,而且也促进了根际土壤中P的活化,对混交林施肥能明显改善林地养分环境<sup>[54]</sup>。陈立新<sup>[30]</sup>认为,施肥能提高土壤有机质、全P、全N、水解N和无机P的含量。

#### 2.4.4 施肥对土壤生物和土壤生化活性的影响

土壤微生物是陆地生态系统的主要组成部分<sup>[55]</sup>与土壤资源的有效性(土壤养分、温度、水分和pH值等)密切相关。施肥能够改善落叶松林地土壤微环境,提高土壤微生物数量。施肥对不同发育阶段的落叶松人工林的5种土壤酶活性有显著影响,但影响效果有所不同<sup>[56]</sup>。施肥也会使土壤动物群落发生变化。庄海峰等<sup>[57]</sup>研究表明,施肥可影响落叶松人工林的土壤密度,增加林分土壤动物类群数,改变林分不同食性土壤动物的密度,使腐食性土壤动物数量降低、植食性数量增加,但捕食性数量变化不明显。

### 3 研究展望

林木施肥是改善人工林土壤状况、提高人工林生产力的重要技术措施。落叶松作为我国北方主要的速生造林树种,在森林碳汇和生态环境改善方面也起着越来越重要的作用。近几十年来,我国在落叶松人工林施肥研究方面做了一些有意义的探索,也取得了一定的成果。但是,有效地减缓落叶松林地衰退还需要做很多研究。特别是在施肥方面需要更加深入的研究,为落叶松人工林经营管理和发展提供技术支撑。笔者认为,未来需要从以下几个方面开展进一步研究:1) 加强对落叶松人工林林分发育阶段养分需求规律研究与培育目标下的分类研究,避免盲目施肥;2) 研究比较不同生态与土壤类型下不同营养元素的施肥效应和合理配比;3) 依据不同土壤和生态条件,按照人工林生长质量建立N、P和K施肥模型以及营养诊断标准和模型,定量研究施肥系统的养分循环过程;4) 应用3S技术建立人工林养分管理系统,监测人工林养分状况,确定施肥方案,既可以提高肥料利用率,获得更大的经济效益;也可以观察人工林生态效应,保持林地的可持续利用和林业的可持续发展。

#### 参 考 文 献

[1] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志: 第七卷: 裸子植物门[M]. 北京: 科学出版社, 1978: 542.  
 [2] ZHANG P H, SHAO G F, ZHAO G, et al. China's forest policy for the 21st century[J]. Science 2000, 288(5474): 2135-2136.  
 [3] MAO Q Z, WATANABE M, KOIKE T. Growth characteristics of two promising tree species for afforestation, birch and larch in the northeastern part of asia[J]. Eurasian Journal of Forest Research, 2010, 13(2): 69-76.  
 [4] SON Y, LEE I K, RYU S R. Nitrogen and phosphorus dynamics in

foliage and twig of pitch pine and japanese larch plantations in relation to fertilization[J]. Journal of Plant Nutrition 2000, 23(5): 697-710.  
 [5] PAUWELS D, LEJEUNE P, RONDEUX J. Growth model for larch in pure and even-aged stands[J]. Biotechnologie Agronomie Societe et Environnement 2003, 7(2): 87-97.  
 [6] THOMAS S C, HALPERN C B, FALK D A, et al. Plant diversity in managed forests: understory responses to thinning and fertilization[J]. Ecological Applications 1999, 9(3): 864-879.  
 [7] THOMAS S C, HALPERN C B, FALK D A, et al. Plant diversity in managed forests: understory responses to thinning and fertilization[J]. Ecological Applications 1999, 9(3): 864-879.  
 [8] 马亚娟, 徐福利, 王涓玲, 等. 氮磷提高华北落叶松人工林地土壤养分和酶活性的作用[J]. 植物营养与肥料学报 2015, 21(3): 664-667.  
 [9] HARDING R B, JOKELA E J. Long-term effects of forest fertilization on site organic-matter and nutrients[J]. Soil Science Society of America Journal 1994, 58(1): 216-221.  
 [10] Van MIEGROET H, NORBY R J, TSCHAPLINSKI T J. Nitrogen fertilization strategies in a short-rotation sycamore plantation[J]. Forest Ecology and Management 1994, 64(1): 13-24.  
 [11] SCHROTH G, RODRIGUES M R L, D'ANGELO S A. Spatial patterns of nitrogen mineralization, fertilizer distribution and roots explain nitrate leaching from mature amazonian oil palm plantation[J]. Soil Use and Management 2000, 16(3): 222-229.  
 [12] WANG Q K, WANG S L, LIU Y X. Responses to N and P fertilization in a young eucalyptus dunnii plantation: microbial properties, enzyme activities and dissolved organic matter[J]. Applied Soil Ecology 2008, 40(3): 484-490.  
 [13] EVANS J. Long-term productivity of forest plantations - status in 1990 [C]. Proceedings of the Nineteenth World International Union of Forest Research Organisations Congress, Montreal, 1990.  
 [14] WEBB L J, TRACEY J G, HAYDOCK K P. A factor toxic to seedlings of the same species associated with living roots of the non-gregarious subtropical rain forest tree grevillea robusta[J]. Journal of Applied Ecology 1967, 4(1): 13-25.  
 [15] CHU-CHOU M. Effects of root residues on growth of *Pinus radiata* seedlings and a mycorrhizal fungus[J]. Annals of Applied Biology, 1978, 90(3): 407-416.  
 [16] 王秀石. 落叶松人工林土壤因子变化规律的研究[J]. 吉林林业科技 1982(4): 1-11.  
 [17] 陈喜全, 郭秋慧, 王政权. 落叶松纯林与落叶松胡桃楸混交林下土壤理化性质的研究[J]. 东北林业大学学报, 1991, 19(增刊1): 258-267.  
 [18] 魏丽娟, 崔晓阳. 针阔叶人工林对黑土理化性质的影响[J]. 林业科技 1994, 19(1): 4-7.  
 [19] 于洋, 王海燕, 丁国栋, 等. 华北落叶松人工林土壤微生物数量特征及其与土壤性质的关系[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(3): 76-80.  
 [20] 阎德仁, 刘永军, 刘永宏. 落叶松人工林土壤肥力与防治地力衰

- 退趋势的研究[J]. 内蒙古林业科技,1996(3):93-98.
- [21]王新宇,王庆成.水曲柳落叶松人工林近自然化培育对林地土壤理化性质的影响[J]. 林业科学,2008,44(12):21-27.
- [22]WANG W J, QIU L, ZU Y G, et al. Changes in soil organic carbon, nitrogen, pH and bulk density with the development of larch (*Larix gmelinii*) plantations in China[J]. Global Change Biology,2011,17(8):2657-2676.
- [23]雷瑞德,党坤良,张硕新,等.秦岭南坡中山地带华北落叶松人工林对土壤的影响[J]. 林业科学,1997,33(5):463-470.
- [24]YONG L C, SHI J H, XIANG M S. Nutrient characteristics in rhizosphere of pure and mixed plantations of manchurian walnut and dahurian larch[J]. Journal of Forestry Research,2001,12(1):18-20.
- [25]YANG K, ZHU J J, YAN Q L, et al. Changes in soil P chemistry as affected by conversion of natural secondary forests to larch plantations[J]. Forest Ecology and Management,2010,260(3):422-428.
- [26]闫德仁,刘永军,王晶莹,等.落叶松人工林土壤肥力与微生物含量的研究[J]. 东北林业大学学报,1996,24(3):46-50.
- [27]吉艳芝,冯万忠,陈立新,等.落叶松混交林根际与非根际土壤养分、微生物和酶活性特征[J]. 生态环境,2008,17(1):339-343.
- [28]孙翠玲,郭玉文,郭泉水.日本落叶松人工林重茬林地土壤养分含量变化及其对林木生长的影响[J]. 林业科学研究,1997,10(3):98-101.
- [29]陈乃全,尹建道.落叶松人工林重茬效果研究[C]//中国林学会.造林论文集.北京:中国林业出版社,1990:105-113.
- [30]陈立新.落叶松人工林土壤质量变化规律与调控措施的研究[D].北京:中国林业科学研究院,2003:160-164.
- [31]KENK G, FISCHER H. Evidence from nitrogen fertilisation in the forests of germany [J]. Environmental Pollution ( Barking, Essex: 1987),1988,54(3/4):199-218.
- [32]易咏梅,杨兰芳,彭锦云,等.日本落叶松纤维材幼林施肥效应研究[J]. 华中农业大学学报,2001,20(4):391-394.
- [33]董健,尤文忠,范俊岗,等.日本落叶松近熟林施肥效应[J]. 东北林业大学学报,2002,30(3):8-12.
- [34]吉艳芝.施肥对落叶松人工林土壤肥力及生理活性影响的研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2002:12-19.
- [35]王立中,石德山,任胜林,等.兴安落叶松天然林林地施肥技术研究[J]. 林业科技,1997,22(4):21-22.
- [36]李贻铨,杨承栋.中国林木施肥与营养诊断研究现状[J]. 世界林业研究,1998,11(3):59-66.
- [37]苏铁成.日本落叶松人工幼林施肥试验效果初报[J]. 辽宁林业科技,1987(5):15-20.
- [38]吉艳芝,冯万忠,张笑归.施肥对落叶松人工林林地土壤肥力的可持续性的影响[J]. 生态环境,2004,13(3):376-378.
- [39]吴耀先,宋德利,王永祥,等.落叶松人工中幼林施肥试验及效益分析[J]. 辽宁林业科技,1996(5):13-16.
- [41]陈立新.施肥对落叶松人工林根际土壤生化活性的影响[J]. 水土保持学报,2003,17(3):133-136,177.
- [41]刘梅,陈春伟,侯艳,等.长白落叶松人工幼林施肥效果分析[J]. 山东林业科技,2006(5):38-39.
- [42]高伟航.施肥对落叶松二代林生长的影响[J]. 河北林果研究,2014,29(2):129-132.
- [43]姜国斌,刘财富,杨军.落叶松中幼龄人工林的施肥效应研究[J]. 辽宁林业科技,1992(6):36-39.
- [44]易咏梅,谢忠华,章定清,等.日本落叶松幼林复合肥施肥效应[J]. 华中农业大学学报,2000,19(5):446-449.
- [45]徐福利,赵亚芳,张潘,等.施肥对华北落叶松人工林根茎叶中氮磷含量的影响[J]. 林业科学,2014,50(3):139-143.
- [46]赵琼,刘兴宇,胡亚林,等.氮添加对兴安落叶松养分分配和再吸收效率的影响[J]. 林业科学,2010,46(5):14-19.
- [47]吉艳芝,陈立新,薛宝民,等.施肥对落叶松人工林植物养分及生理特性的影响[J]. 生态环境,2004,13(2):217-219.
- [48]于水强,王政权,史建伟,等.氮肥对水曲柳和落叶松细根寿命的影响[J]. 应用生态学报,2009,20(10):2332-2338.
- [49]于立志,丁国泉,史建伟,等.施肥对日本落叶松人工林细根直径、根长和比根长的影响[J]. 应用生态学报,2007,18(5):959-964.
- [50]孙玥,全奎奎,贾淑霞,等.施用氮肥对落叶松人工林一级根外生菌根侵染及形态的影响[J]. 应用生态学报,2007,18(8):1727-1732.
- [51]于立志,丁国泉,朱教君,等.施肥对日本落叶松不同根序细根养分浓度的影响[J]. 应用生态学报,2009,20(4):747-753.
- [52]贾淑霞.落叶松和水曲柳人工林土壤、根系和土壤微生物呼吸研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2009:56-66.
- [53]张潘.施肥对华北落叶松人工林根茎叶氮磷含量及生态化学计量规律的影响[D].北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2013:26-30.
- [54]吉艳芝,陈立新.施肥对落叶松人工林土壤磷有效性的影响[J]. 水土保持学报,2003,17(2):41-43.
- [55]ALLEN A S, SCHLESINGER W H. Nutrient limitations to soil microbial biomass and activity in loblolly pine forests [J]. Soil Biology and Biochemistry,2004,36(4):581-589.
- [56]陈立新.落叶松人工林施肥对土壤酶和微生物的影响[J]. 应用生态学报,2004,15(6):1000-1004.
- [57]庄海峰,孙玥,谷加存,等.施氮肥对落叶松和水曲柳人工林土壤动物群落的影响[J]. 生物多样性,2010,18(4):390-397.