

DOI: 10.5846/stxb201806261404

刘云超, 陈立新, 段文标, 白永安, 赵玉民. 沙地云杉林研究述评. 生态学报, 2020, 40(1): 34-42.

Liu Y C, Chen L X, Duan W B, Bai Y A, Zhao Y M. Review of the studies on *Picea mongolica* forest. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(1): 34-42.

## 沙地云杉林研究述评

刘云超<sup>1,2</sup>, 陈立新<sup>1</sup>, 段文标<sup>1,\*</sup>, 白永安<sup>3</sup>, 赵玉民<sup>3</sup>

1 东北林业大学 林学院, 哈尔滨 150040

2 赤峰学院 资源与环境科学学院, 赤峰 024001

3 内蒙古白音敖包国家自然保护区, 白音敖包 025350

**摘要:**沙地云杉(*Picea mongolica*)是我国特有的针叶林树种,主要分布于内蒙古白音敖包国家级自然保护区。在该地区的防风治沙、退化土壤的生态恢复、三北防护林体系建设等方面起着重要作用。从沙地云杉林的生长环境、个体生态、种群生态、群落生态等方面对国内外的研究现状和最新研究进展进行了综述,并从不同尺度上对沙地云杉林未来研究中应该重视的一些科学问题进行了展望。这些科学问题主要有:(1)沙地云杉个体生长、生殖和保护的结构和生理机理方面的研究。(2)沙地云杉种群与群落方面的研究包括:生命表与生育力表编制与统计;种内与种间的关系;化感作用;种群、群落发生、发展和衰亡的内在机制;自然干扰和人为干扰对沙地云杉更新的研究;全球气温变化对沙地云杉林天然更新的影响等。(3)沙地云杉林生态系统方面的研究包括:大量和微量营养元素在沙地云杉林的凋落物-微生物-土壤-沙地云杉的循环、利用规律及转化机理;凋落物分解规律及机理;水分循环;土壤理化性质和生化特性对沙地云杉生长和生物量的影响;沙地云杉林生态系统能量流动和信息传递研究等。(4)沙地云杉林生态经营研究;沙地云杉丰产林营造技术;沙地云杉种子园、母树林规划与创建;沙地云杉林杆插繁殖技术与无性系研究;幼树移栽技术;沙地云杉天然林和人工林施肥技术;沙地云杉林病虫害预测与防治研究等。

**关键词:**白音敖包;沙地云杉;生态系统;研究现状

## Review of the studies on *Picea mongolica* forest

LIU Yunchao<sup>1,2</sup>, CHEN Lixin<sup>1</sup>, DUAN Wenbiao<sup>1,\*</sup>, BAI Yong'an<sup>3</sup>, ZHAO Yumin<sup>3</sup>

1 College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

2 School of Resource and Environmental Sciences, Chifeng University, Chifeng 024001, China

3 Baiyinaobao National Nature Reserve Management Administration, Baiyinaobao, 025350, China

**Abstract:** *Picea mongolica* is a unique species of conifer in China, mainly growing in the Baiyinaobao National Reserve, Inner Mongolia. It plays a significant role in protecting against wind and controlling desertification, improving the ecological environment in this region of soil degradation, as well as constructing the Three-North Shelterbelt. In this paper, the present situation and the latest research progress on *Picea mongolica* at home and abroad were reviewed from the aspects of growth environment, individual ecology, population ecology, and community ecology. Some scientific questions that should be paid attention to in future studies of *Picea mongolica* were proposed at different scales. These scientific issues include (1) studies on the structure and physiological mechanisms of the growth, reproduction, and protection of *Picea mongolica*. (2) Points of study on *Picea mongolica* populations and communities in the desert are as follows: compilations and statistical analysis of life tables and fertility tables; intraspecific and interspecific relationships; allelopathy; internal mechanisms of occurrence; development and decline of populations and communities; the regeneration of *Picea mongolica* by natural

**基金项目:**国家自然科学基金项目(31770656);内蒙古自然科学基金项目(2017MS0327);内蒙古自治区高等学校科研项目(NJZY16255);赤峰学院院士专家工作站项目(cfxys201709)

**收稿日期:**2018-06-26; **网络出版日期:**2019-10-25

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dwbiao88@163.com

disturbance and man-made disturbance; the effect of global temperature change on the natural regeneration of *Picea mongolica*. (3) Studies on the ecosystem of *Picea mongolica* are as follows: the cycle, utilization rules, and transformation mechanisms of a large number of micronutrients in litters; microorganism-soil-*Picea mongolica* systems; decomposition laws and mechanisms of litter; water cycle; effects of soil physicochemical and biochemical properties on the growth and biomass of *Picea mongolica*; energy flow and information transfer in the *Picea mongolica* forest ecosystem. (4) Studies on the ecological management of *Picea mongolica* are as follows: technology for *Picea mongolica* construction; planning and establishment of *Picea mongolica* seed orchards and mother forests; *Picea mongolica* forest breeding technology and clone research; sapling transplanting technology; fertilization technology for natural and artificial *Picea mongolica* forests; forecast and control of diseases and insect pests of *Picea mongolica*.

**Key Words:** Baiyinaobao; *Picea mongolica*; ecosystem; research status

沙地云杉(*Picea mongolica*)是我国特有的针叶林树种,其主要分布区位于华北山地和大兴安岭山地向内蒙古高原的过渡地带,主要分布于浑善达克沙地东部边缘,是赤峰市、锡林浩特市特有的乡土树种之一,也是我国沙地上造林的首选树种之一<sup>[1-4]</sup>。我国沙地云杉的研究起步较晚,解放前对其的研究和报道少见,直到1978年,陈炳浩等首次对其生物量、生产力等进行研究<sup>[5]</sup>,从而开启了我国沙地云杉林研究的序幕。此后,众多学者对沙地云杉林的成因、分布、类型、结构、动态等进行了全面系统的研究和探讨。本文主要从沙地云杉林的生态环境研究、沙地云杉的个体生态学、种群生态学、群落生态学、生态保护等方面综述了近几十年来我国学者对其的研究情况,分析了在以往研究中尚未解决的问题以及未来研究的重点,以期为我国沙地云杉林的经营管理提供参考。

## 1 沙地云杉林生长环境研究

沙地云杉林集中分布在白音敖包沙地(43°30'—43°36'N, 117°03'—117°16'E)的阴坡和阳坡上,面积约为1947 hm<sup>2</sup>。该地区为温带草原气候,年均气温-1.4℃,年均降雨量448.9 mm,土壤为灰色森林土,砂层厚度10—100 cm<sup>[1, 6]</sup>。对沙地云杉生长和更新的林内生态因子的时间异质性和空间异质性很大。王伟等<sup>[3]</sup>、Zou等<sup>[4]</sup>、邹春静等<sup>[7]</sup>发现,有树的阴坡对其生长和更新最为有利。阳坡相反。水热组合状况是影响沙地云杉林地理分布规律的最重要生态因子,沙地云杉林的海拔分布下限为1300 m,上限为2100 m,温度指数约为25.1℃·月和41.1℃·月<sup>[3, 7-8]</sup>。徐文铎等<sup>[9]</sup>、郑元润等<sup>[10]</sup>根据实地调查和定位观测资料,对沙地云杉生长状况和生态条件的关系进行了研究。结果表明,沙地云杉为昼夜生长类型,夜间生长高于昼间,6月高生长约占全年的65%。且6月份的水热条件决定年树高生长量的大小。土壤含水量与树高生长有密切关系,在幼苗期适度遮荫可促进树高生长。常禹等将白音敖包沙地云杉保护区分为20个生境类型<sup>[11]</sup>。

## 2 沙地云杉林个体生态学研究

沙地云杉林个体生态学研究过程中,其生理生态研究是众多学者研究的热点。邹春静等通过干旱胁迫对沙地云杉生态型保护酶活性实验研究发现,沙地云杉抗旱能力紫果型最强,绿果型最弱<sup>[12]</sup>。这与李苗苗等<sup>[13]</sup>、邹春静等<sup>[14]</sup>研究结果相一致。在持续光照、持续黑暗和16 h光照/8 h黑暗时,种子萌发最适宜温度分别为15℃、20℃和30℃,种子萌发最适宜土壤含水量为15%<sup>[15]</sup>。刘有军等<sup>[16-17]</sup>、朱国庆等<sup>[18]</sup>、李银科等<sup>[19]</sup>研究发现,15—30℃范围内沙地云杉有较高的发芽率,20—25℃为沙地云杉发芽的最适温度。14 h光照/8 h黑暗交替为沙地云杉种子萌发光照条件,出苗最适沙埋深度为0.5 cm<sup>[16]</sup>。李苗苗等研究发现低浓度的Ca<sup>2+</sup>提高其抗旱性效果显著,高浓度的Ca<sup>2+</sup>效果不显著,甚至因为高渗可能降低<sup>[13]</sup>。

郭连生等通过仪器测定了沙地云杉(当时是白杆云杉)幼树蒸腾生理特性,并建立了土壤水分充足条件下的回归方程,认为幼树蒸腾速率在土壤充足供水条件下主要受气象因子影响<sup>[20-21]</sup>。邹春静等对沙地云杉

蒸腾强度规律研究发现,其蒸腾作用受气温和光照等因子影响;蒸腾强度 6—7 月为双峰型,而 8—9 月为单峰型,最大蒸腾强度出现在 7 月中下旬,叶龄越大,蒸腾速率越低<sup>[22]</sup>。王飞等研究发现,干旱胁迫加剧,沙地云杉净光合速率(Net Photosynthetic Rate, Pn)、气孔导度(Stomatal Conductance, Gs)、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度(Intercellular CO<sub>2</sub> Concentration, Ci)和蒸腾速率(Transpiration Rate, Tr)也随之降低,Pn 在土壤含水量 17% 时最大。Ci 和 Gs 同时降低,故认为气孔因素是导致沙地云杉叶片净光合速率下降的主要因素<sup>[23]</sup>。邹春静等研究发现,干旱胁迫加剧,叶片中 3 种生态型的超氧化物歧化酶(Superoxide Dismutase, SOD)活性先上升,后下降;紫果型过氧化氢酶(Catalase, CAT)活性一直上升,红果型和绿果型则先升后降;抗坏血酸过氧化物酶(Ascorbate Peroxidase, ASP)、过氧化物酶(Peroxidase Isozyme, POD)的活性变化趋势一致,紫果型一直大幅度增加,红果型和绿果型则开始迅速增加后迅速下降。根部各种酶活性变化规律与叶片中基本一致<sup>[12]</sup>。干旱胁迫强度增强,丙二醛(Malondialdehyde, MDA)含量在叶、根中呈上升趋势,叶片中 MDA 含量明显高于根中的含量<sup>[14]</sup>。王逸然等发现在生长季,沙地云杉叶、枝、根、树皮等不同器官中的非结构性碳水化合物(Non-structural Carbohydrates, NSC)中的淀粉含量变化规律基本上一致,5 月达到最大值后下降,8—10 月则维持在较低水平;可溶性糖含量 5 月略低,后逐渐上升,10 月则达到最高。方差分析表明,沙地云杉不同器官中淀粉、可溶性糖及 NSC 含量与温度、降水等气候因子的相关性并不显著<sup>[24]</sup>。Zou 等<sup>[25]</sup>、邹春静等<sup>[26]</sup>进行了人工模拟摘叶实验,发现沙地云杉幼树在一定失叶率的条件下存在补偿和超补偿效应。李小燕等研究了沙地云杉等 8 种杉属植物叶片提取物的抗氧化性,沙地云杉叶片提取液中多酚、黄酮含量均最高。沙地云杉抗氧化仅低于青杆<sup>[27]</sup>。

### 3 沙地云杉林种群生态学研究

#### 3.1 沙地云杉构件研究

沙地云杉是构件生物,其根、茎、叶、花、果实属于不同构件,每种构件就是一个“无性系”的种群。因此,研究沙地云杉根、茎、叶、花、果实等不同构件是其种群生态学研究的重点之一。邹春静等利用 1/4 营养空间扇形挖掘法对沙地云杉的根系进行研究,发现其根系密度在水平分布随着树基距离增大而减小,且属于浅根型<sup>[28]</sup>。徐文铎等发现 1 年生幼苗一直保持高生长率,根系生长优先,5 年生幼苗在接近生长上限时,增长越来越慢;根、茎、叶等器官干物质的生产符合理查德模型<sup>[29]</sup>。沙地云杉幼苗的所有构件中,根的生长最快;针叶寿命随树龄而变化,树龄增大雄花比例逐渐变大,枝的数量、枝长、小枝数等也随年龄增大而增大<sup>[30-31]</sup>。Zou 等<sup>[30]</sup>和郑元润等<sup>[32]</sup>研究表明,沙地云杉树冠半径以东侧最长,西侧最短,南北相差不大。邹春静等<sup>[33]</sup>、Liu 等<sup>[34]</sup>发现 3 种生态型过氧化物同工酶和酯酶同工酶的酶带条数和酶带强度依次为:紫果型 > 红果型 > 绿果型。

邹春静等研究发现,干旱胁迫明显抑制了沙地云杉幼苗高生长<sup>[14]</sup>。王飞等发现沙地云杉林的土壤含水量降低,其叶片组织含水量与相对含水量逐渐降低,沙地云杉树龄增加,叶片净光合速率逐渐降低,其 10 龄光合最活跃,光合产物最高<sup>[35]</sup>。师生波等<sup>[36]</sup>研究显示沙地云杉具有光化学和非光化学猝灭特性,对于干旱荒漠生境的驯化适应具有趋同性。黄三祥等发现,苗木地径和苗高的年生长规律基本相似,6 月下旬气温增高,苗高生长直线稳步上升,地径生长不断加快;7 月中旬苗高生长达最高峰,而地径生长 8 月中旬才达到最大值,尔后进入硬化期。相关分析表明,地面温度、地面最高温度、15 cm 土壤温度是影响地径的主要因子;地面温度、地面最高温度、20 cm 土壤温度等是影响苗木生长的主要因子<sup>[37]</sup>。周措尤<sup>[38]</sup>研究结果与其一致。

#### 3.2 沙地云杉林种群动态与分布格局研究

沙地云杉林种群的动态是其种群生态学的核心问题,主要研究沙地云杉林种群在空间上和时间上的变动规律,包括沙地云杉林种群数量、密度、种群分布、种群的变动与其扩散迁移和种群调节等规律。郑元润等通过编制生命表等对沙地云杉林种群动态进行了深入研究,通过主成分分析发现:坡向、坡位、海拔、群落类型、土壤含水量、土壤平均容重、针叶密度等 7 个环境因子是影响沙地云杉种群自疏过程的主要因子<sup>[39]</sup>。郑元润

等<sup>[40-41]</sup>、Zou 等<sup>[42]</sup>依据野外调查所得数据,运用 R.May 种群稳定性理论,Leslie 种群增长模型,对沙地云杉种群的稳定性及种群动态的增长过程进行了分析,发现沙地云杉是缓慢增长种群,种群数量呈现稳定的极限环类型,受干扰后的恢复时间相对较短。

沙地云杉林种群个体在水平间的配置状况或分布样式属于沙地云杉林种群分布格局,能反映沙地云杉个体在水平空间上彼此的互相关系。徐文铎等<sup>[43]</sup>调查发现,沙地云杉林种群的分布格局无论年龄和树木级大小,都属于集群分布。随着幼苗—小树—中树—大树聚集程度逐渐降低,逐渐趋于随机分布。郑元润等分析了各种方法在沙地云杉林种群分布格局研究中的应用,认为方差/均值比率法是分析其群落分布格局较为优越的方法<sup>[44]</sup>。

### 3.3 沙地云杉林种内、种间关系研究

沙地云杉林的密度效应是其种内关系的最主要表现。在对沙地云杉林种内、种间的竞争强度进行定量分析时,邹春静等采用了 Hegyi 提出的单木竞争指数模型,发现其种内竞争强度随林木径级增大而减小<sup>[45]</sup>。郑元润等通过种群密度调节的 $-3/2$  自疏法则对沙地云杉林自疏过程进行研究,对种群密度变化动态进行模拟,发现种群的平均胸径、单株干物质与种群密度之间的关系表现出幂函数的变化特征<sup>[39]</sup>。部分学者在沙地云杉林种间关系方面也做了一定研究。石鑫等对沙地云杉林内生真菌种群进行分离、培养、鉴定。发现随着树龄增长,其内生真菌的种群和数量不断增加,采集部位不同,其内生真菌的种群数量和分布差异很大<sup>[46]</sup>。任燕等发现红果型沙地云杉内生真菌的多样性比较丰富<sup>[47]</sup>。

### 3.4 沙地云杉林种群生活史研究

种群的生活史往往由于其遗传物质所决定,一般是不能改变的。但在外界条件的影响下,在一定范围内,其某些性状具有可塑性。白玉娥等<sup>[48]</sup>确定了沙地云杉胚性愈伤组织诱导的最适培养基和最佳激素组合。娄迎春等发现沙地云杉体细胞胚胎在诱导和增殖阶段,蔗糖酶活力变化具有相同趋势,愈伤组织的蔗糖酶活力变化稳定<sup>[49]</sup>。

沙地云杉林对所在地长期生存环境的不同适应方式形成了不同生活史式样,也产生了沙地云杉的不同生殖对策。郑元润等<sup>[50]</sup>、Zou 等<sup>[42]</sup>通过沙地云杉林生殖力表和有关参数发现,种群的净增殖率较高,内禀增长率和周期增长率较低;种群世代周期大约 100 年。种群适应环境条件变化所采取的生殖对策有 5 种类型:r 对策型、偏 r 对策型、r、k 对策的过渡型、偏 k 对策型和 k 对策型。种鳞宽度、球果宽度、生殖分配、单株平均材积、球果长度等都是影响其生殖对策的主要因子<sup>[50]</sup>。邹春静等发现,距离母树 5—10 m 种子雨强度最大;顺风方向种子雨强度最大,逆风方向强度最小;种子雨可持续 2 周左右,种子雨强度最大时在 2—5 天内,以后迅速递减<sup>[51]</sup>。自然状态下,结实有大小年之分,间隔期一般为 3—4 年;树龄越大,中层的结实量越大,上层的结实量越少;东侧和北侧小于南侧和西侧;孤树和阴坡的结实量比其他类型的树木大;绿果型和紫果型的结实量比红果型球果小<sup>[52-53]</sup>。随着树木年龄增大,球果产量迅速增加<sup>[5]</sup>。Liu 等<sup>[34]</sup>研究表明:3 种生态型(紫果型、红果型、绿果型)球果明显不均匀。Shi 等<sup>[54]</sup>利用多态性微卫星研究 3 种生态型群体的遗传变异和分化水平时,在配对组比较中发现了显著的遗传分化水平。聚类分析表明,这 3 个组均来源于单个基因库。沙丘的水分差异可能导致沙地云杉林种群的观测分化。

沙地云杉林的天然更新也是学者们研究其种群生活史的重点之一,邹春静等<sup>[53]</sup>发现沙地云杉林幼苗补充主要通过林下更新、生态场更新、林窗更新、坡地更新、灌丛内更新等形式,且只要有庇荫条件和合适的水分热量组合等条件,沙地云杉就能自我更新。沙地云杉种子靠风力传播,其传播距离与风速、地形、林况等有关。刘涛等<sup>[55]</sup>发现在沙地云杉母树 30—40 m(1.5—2 倍树高)以外,仅靠天然下种达不到有效的更新密度。有效传播范围内的更新状况决定于种子与母树的距离、植被状况及立地条件。王伟等通过回归方程对各龄级幼树的实测株数进行了计算,认为沙地云杉林具有自然更新能力,然而幼树死亡率较高;每个龄级(5 年)将有近一半的幼树死亡<sup>[4]</sup>。邹春静等认为沙地云杉林种群其生态场为半椭圆形特殊的非均匀场,强度随与母树距离的增大而变化,初时迅速增大,达到 3—5 m 处最大后逐渐下降。生态场的重叠会使在叠加部分的场强明显增

大。生态场的作用范围还与坡度、坡长等地形因子及树高、冠半径等测树因子有着密切的关系<sup>[56]</sup>。黄三祥等发现天然更新的幼苗、幼树呈聚集分布,且死亡率高;沙地云杉的枯枝落叶层厚度、腐殖质层厚度及下木盖度对沙地云杉林天然更新影响最大;海拔高度和坡度对其影响较小<sup>[57]</sup>。

沙地云杉林的林窗大多由风倒木形成,面积平均在 120 m<sup>2</sup>左右。更新现象在林窗内也很强烈,林窗南侧和西侧都大于北侧和东侧;其随距林窗中心的距离增大而增大,然后减小;而在林窗北侧和东侧,则随着距中心距离的增大而减小<sup>[58]</sup>。与 Zou 等发现规律基本一致<sup>[59]</sup>。沿着森林的边缘,幼苗的生长暂时得以提高<sup>[58]</sup>。Zhang 等<sup>[60]</sup>调查的结果表明,在林隙中间,随着林隙大小增加,树苗的总数以及它们相对的比重显著下降。由于土壤水分低、土壤温度高,大间隙或空地环境也不利于树苗的建立和生长。

## 4 沙地云杉林群落生态学研究

### 4.1 沙地云杉林群落植物区系研究

前人对沙地云杉林集中分布区的物种种类组成、种类数量做了大量的研究。徐文铎认为沙地云杉林在植物区系上应属于泛北极植物区,欧亚草原植物亚区,蒙古草原地区,东蒙古亚地区范畴<sup>[61]</sup>。邹春静等通过野外调查,植物区系成分分析得出,白音敖包地区共有 10 种地理成分分布类型,并以达乌里-蒙古成分占绝对优势,只有沙地云杉 1 种是内蒙古地区特有成分。相似系数比较分析认为沙地云杉林仍属于暗针叶林范畴<sup>[43,62]</sup>。黄泽东等通过野外实地调查、标本鉴定和文献研究后表明,白音敖包自然保护区植物物种多样性较为丰富,区系温带性质明显,区系属与达里诺尔的属相似系数最高<sup>[63]</sup>。Zou 等认为沙地云杉属白杆云杉系列,是白杆云杉在长时间适应当地气候从而演化出来的地方种<sup>[64]</sup>。其研究结果与徐文铎等、白玉娥等、蔡萍等、郑舒文等、李春红等、段国珍等分别采用不同分子鉴定技术鉴定沙地云杉、白杆和红皮云杉亲缘关系得出结果相一致<sup>[65-70]</sup>。

### 4.2 沙地云杉林群落结构、类型研究

众多学者对沙地云杉林群落内生物种类在空间上的配置状况进行了研究。Zou 等研究了沙地森林草原过渡带的斑块结构,包括组成结构和大小结构;同时研究了斑块的动态及相互转化的规律<sup>[71]</sup>。王伟等研究认为沙地云杉林垂直结构可分为乔木层、灌木层、草本层和地被层<sup>[4]</sup>。邹春静等根据 Raunkiaer 生活型分类系统对其群落生活型谱进行了划分,依次分为地面芽植物、地下芽植物、高位芽植物、地上芽植物以及 1 年生植物和苔藓植物。并以藓类、苔草沙地云杉林和白桦沙地云杉混交林为代表对群落镶嵌结构进行分析,划分 3 类 10 个小群落<sup>[72]</sup>。根据种类组成、结构和生态条件的不同,划分为藓类苔草沙地云杉林、禾草杂类草沙地云杉林、杂类草白桦沙地云杉林及沿河沙地云杉林 4 个群丛<sup>[53]</sup>。付彩虹等对多伦县的沙地云杉和白桦混交林 3 条样带的物种多样性进行调查后发现,沙地云杉和白桦混交林的植物种类、物种多样性丰富,垂直结构分层明显。物种多样性指数变化规律均为草本层>灌木层>乔木层;物种均匀度指数变化规律与之相反<sup>[73]</sup>。

### 4.3 沙地云杉林群落动态研究

研究发现沙地云杉林的群落动态变化类型主要有进展演替和逆行演替两种形式。进展演替又分为两条途径:先是沙生先锋群落阶段-根茎禾草杂类草群落阶段,后因地形分异出现两种分化:一条是在固定沙丘的阴坡或者半阴坡,最后形成稳定性较高的藓类苔草沙地云杉林;另一条则在沙丘的阳坡、顶部或是缓起伏的沙地上形成的禾草杂类草沙地云杉林。逆行演替常见有两类:阴坡的沙地云杉林被杨桦林或灌丛取代,再向草原化发展;阳坡的沙地云杉林向草原化发展。若没有人类活动的干扰,沙地云杉将进行进展演替<sup>[53]</sup>。

沙地云杉林群落动态发展过程中,人工进行有目的、有意识的干扰,可以对自然生态环境中的沙地云杉林群落产生促进、改造、重建甚至是种群的扩散作用。比如人工育苗、引种等。刘琴等<sup>[74]</sup>从采种、育苗、播种到播后管理等方面对沙地云杉生物学特性与繁育技术进行了研究。刘向民等在白音敖包林场对沙地云杉不同条件下进行造林,发现在林隙间、树冠下及深坑庇荫处沙地云杉幼苗成活率较高,效果好<sup>[75]</sup>。包兴华等通过生产试验发现,沙地云杉在高寒漫甸区利用机械开沟整地方式,造林成活率、保存率,幼树生长量均提高。采

用座水覆膜、容器苗栽植等措施在沙地造林的成活率可提高 20%—30%<sup>[76]</sup>。李银科等发现河西地区的温度条件对沙地云杉生长发育适宜,但必须进行人工灌水。沙地云杉 7 年后的生长速度超过原产地白音敖包,适应性强。在河西地区具有较大的发展潜力<sup>[77]</sup>。林文霞等 2012 年春季在呼伦贝尔市半固定沙地和流动沙地进行造林试验,并观测了沙地云杉成活率、保存率及生长量,初步确定在呼伦贝尔沙地可以进行沙地云杉引种造林<sup>[78]</sup>。

## 5 沙地云杉林生态系统研究

沙地云杉林的物质循环、能量流动和信息传递是沙地云杉林生态系统里的 3 个基本功能,但目前研究报道少见。邹春静等对沙地云杉根表不同距离土体营养元素的研究表明,速效 N、P、K 呈现有规律的梯度分布,因速效 P 被幼苗吸收和利用强度大,可能是沙地云杉生长发育的限制因子<sup>[79]</sup>。陈炳浩等对沙地云杉林的生物量和产量结构进行了不同建模方法研究<sup>[5]</sup>。刘广田等研究结果显示沙地云杉林总生物量为 108.89 t/hm<sup>2</sup>,依次为乔木层、下层木、凋落物。柽柳灌丛的生物量和生产力最大<sup>[80]</sup>。邹春静等所做的枯枝落叶定位分解实验发现:凋落物的分解速率与土壤湿度和地表温度关系密切,其平均分解速度随坡位的升高而降低,瞬时分解速率顺序为:坡中>坡下>坡上<sup>[81]</sup>。

害虫是沙地云杉林中比较常见的生物,属于其生态系统中的消费者,在沙地云杉林生态系统的物质循环、能量流动及信息传递上起着极其重要的作用。但对天然林及人工林的破坏也是显而易见的。萧刚柔等 1958 年在沙地云杉林中共发现云杉腮扁叶蜂、贺兰腮扁叶蜂和白音阿扁叶蜂 3 种害虫<sup>[82]</sup>。韩静波等采用聚集度指标法对云杉腮扁叶蜂的地下越冬幼虫和树上危害幼虫进行空间分布型测定表明,地下越冬幼虫和树上危害幼虫均呈现聚集分布<sup>[83]</sup>。刘涛等发现根据白音阿扁叶蜂取食期幼虫的生命表和各龄幼虫的食量,可以确定 1 龄幼虫虫口密度与取食期食叶量的关系,从而确定防治指标及决定是否需要防治<sup>[84]</sup>。张庆贺等发现重齿小蠹越冬成虫主要分布在被害云杉立木周围 2 m 半径,20 cm 深度的土壤内,虫口密度范围为 0—153 头/dm<sup>3</sup>;其性比在春秋二季未见明显差异,基本接近 1:1<sup>[85]</sup>。这与刘广田等研究结果相似<sup>[86]</sup>。陈国发等利用林间生测技术,对沙地云杉重齿小蠹的聚集信息素开展试验分析。给出了最佳配比方式<sup>[87]</sup>。宋大北等对沙地云杉球果害虫在树冠上的发生规律做了研究,发现云杉球果小卷蛾对球果危害较重的位置在树冠南侧下层,而果梢斑螟对树冠北侧的球果危害较重。球果小卷蛾对沙地云杉球果的危害要大于果梢斑螟,两种害虫对北侧树冠球果的危害大于南侧<sup>[88]</sup>。Fredrik 等认为大规模诱捕甲虫可能会抵消由于气温升高(全球变暖)对沙地云杉树木死亡的压力<sup>[89]</sup>。

## 6 展望

长期以来,国内外学者(主要是国内学者)在沙地云杉林的生长环境、生理生态、种群和群落的结构、分布、类型及动态特点、人工育苗、引种及其病虫害防治等方面做了较多研究。而对其能量流动和养分循环方面的研究相对较少。但这些均为未来的研究奠定了理论基础。在沙地云杉林生态系统中,沙地云杉与森林植被、光照、土壤、水分等环境要素以及各个要素之间关系非常复杂,沙地云杉天然林最佳生长条件有哪些?沙地云杉天然林种内与种间的密度效应如何?在种内与种间相互作用过程中有无化感物质参与?沙地云杉林生长的营养元素在植被、土壤里的迁移转化过程是什么?不同类型的自然干扰(特别是林隙干扰)和人为干扰如何影响沙地云杉的更新等很多问题还不清楚。

综上所述,在沙地云杉林未来的研究中应更加注重如下问题的研究:

(1) 沙地云杉个体生长、生殖和保护的结构和生理机理方面的研究。胚胎、根系、茎、叶、花、果实的分子、细胞等微观研究;水分代谢、矿质营养、光合作用、呼吸作用等基本代谢的规律和机理研究等。

(2) 沙地云杉林种群与群落方面的研究:沙地云杉生命表与生育力表编制与统计;种内与种间的关系研究;化感作用的研究;种群、群落发生、发展和衰亡的内在机制研究;自然干扰和人为干扰对沙地云杉更新的研究。

究;全球气温变化对沙地云杉林天然更新的影响研究等。

(3)沙地云杉林生态系统方面的研究:大量和微量营养元素在沙地云杉林的凋落物——微生物——土壤——沙地云杉的循环、利用规律及转化机理研究;凋落物分解规律及机理研究;水分循环研究;土壤理化性质和生化特性对沙地云杉生长和生物量的影响研究;沙地云杉林生态系统能量流动和信息传递研究等。

(4)沙地云杉林生态经营研究:沙地云杉丰产林营造技术研究;沙地云杉种子园、母树林规划与创建研究;沙地云杉林扦插繁殖技术与性系研究;幼树移栽技术研究;沙地云杉天然林和人工林施肥技术研究;沙地云杉林病虫害预测与防治研究等。

#### 参考文献 (References):

- [1] 罗菊春. 沙地云杉是防沙治沙的优良树种. 中国林业, 2000, (7): 37-37.
- [2] 姜联合. 沙地云杉之源——白音敖包保护区. 植物研究, 2001, (4): 6-6.
- [3] 王炜, 梁存柱, 李洪峰, 刘钟龄, 宝音陶格涛. 白音锡勒草原沙地云杉林的性质、可能成因及自然更新能力的初步研究. 干旱区资源与环境, 2000, 14(2): 59-64.
- [4] Zou C J, Han S J, Zhang J H, Wang C R, Zhou Y M. Characteristics and dynamics of Sandy natural forests in sandy forest-steppe ecotone in the northern area of China. Journal of Forestry Research, 2000, 11(3): 161-166.
- [5] 陈炳浩, 陈楚莹. 沙地红皮云杉森林群落生物量和生产力的初步研究. 林业科学, 1980, 16(4): 269-278.
- [6] 徐文铎, 邹春静, 刘广田. 沙地云杉林的生态条件//徐文铎, 刘广田. 内蒙古白音敖包自然保护区沙地云杉林生态系统研究. 北京: 中国林业出版社, 1998: 2-6.
- [7] 邹春静, 刘广田, 段佩山, 齐淑艳. 沙地云杉林环境异质性分析//徐文铎, 刘广田. 内蒙古白音敖包自然保护区沙地云杉林生态系统研究. 北京: 中国林业出版社, 1998: 7-10.
- [8] 邹春静, 徐文铎, 齐淑艳. 沙地云杉林的分布与性质//徐文铎, 刘广田. 内蒙古白音敖包自然保护区沙地云杉林生态系统研究. 北京: 中国林业出版社, 1998: 11-16.
- [9] 徐文铎, 郑元润, 刘广田. 内蒙古沙地云杉生长与生态条件关系的研究. 应用生态学报, 1993, 4(4): 368-373.
- [10] 郑元润, 徐文铎. 沙地云杉小树高生长与环境条件关系的数量化模型. 生态学杂志, 1997, 16(6): 62-66.
- [11] 常禹, 徐文铎, 南寅镐. 白音敖包自然保护区生境制图的研究//徐文铎, 刘广田. 内蒙古白音敖包自然保护区沙地云杉林生态系统研究. 北京: 中国林业出版社, 1998: 11-16.
- [12] 邹春静, 徐文铎, 靳牡丹, 宋晴. 干旱胁迫对沙地云杉生态型保护酶活性的影响. 干旱区研究, 2007, 24(6): 810-814.
- [13] 李苗苗, 冯雪, 邹春静. 外源  $\text{Ca}^{2+}$  对干旱胁迫下沙地云杉幼苗抗旱性生理指标的影响. 安徽林业科技, 2013, 39(1): 12-14.
- [14] 邹春静, 韩士杰, 徐文铎, 李道棠. 沙地云杉生态型对干旱胁迫的生理生态响应. 应用生态学报, 2003, 14(9): 1446-1450.
- [15] 林涛, 白玉娥, 魏青芸, 方亮. 光照、温度和水分条件对沙地云杉种子萌发影响的研究. 干旱区资源与环境, 2005, 19(2): 188-191.
- [16] 刘有军, 刘世增, 康才周, 满多清. 两种云杉种子萌发和幼苗生长对环境因子的适应性. 生态学报, 2019, 39(2): 611-619.
- [17] 刘有军, 刘世增, 康才周, 满多清. 中国特有植物沙地云杉的濒危机制. 水土保持通报, 2018, 38(3): 60-65, 73-73.
- [18] 朱国庆, 刘世增, 李得禄, 康才周, 严子柱, 满多清, 魏林源, 李治元. 沙地云杉种子萌发及育苗试验. 中国农学通报, 2011, 27(16): 22-26.
- [19] 李银科, 刘世增, 康才周, 满多清, 李得禄. 温度对樟子松和沙地云杉种子萌发特征的影响. 水土保持通报, 2011, 31(4): 73-77.
- [20] 郭连生, 田有亮. 4种针叶幼树光合速率、蒸腾速率与土壤含水量的关系及其抗旱性研究. 应用生态学报, 1994, 5(1): 32-36.
- [21] 郭连生, 田有亮. 9种针阔叶幼树的蒸腾速率、叶水势与环境因子关系的研究. 生态学报, 1992, 12(1): 47-52.
- [22] 邹春静, 刘广田, 齐淑艳, 张远. 沙地云杉蒸腾作用的研究//徐文铎, 刘广田. 内蒙古白音敖包自然保护区沙地云杉林生态系统研究. 北京: 中国林业出版社, 1998: 34-38.
- [23] 王飞, 刘世增, 康才周, 李得禄, 陈政融, 李雪洮. 干旱胁迫对沙地云杉光合、叶绿素荧光特性的影响. 干旱区资源与环境, 2017, 31(1): 142-147.
- [24] 王逸然, 郑成洋, 曾发旭. 内蒙古白音敖包沙地云杉生长季非结构性碳水化合物含量动态. 北京大学学报(自然科学版), 2016, 52(5): 967-976.
- [25] Zou C J, Han S J, Qi S Y, Xu W D, Li D T. Growth responses of *Picea mongolica* seedlings to defoliation rate. Journal of Environmental Sciences, 2005, 17(2): 232-236.
- [26] 邹春静, 徐文铎, 张远, 刘广田. 沙地云杉幼树对食叶害虫危害的补偿与超补偿效应. 应用生态学报, 1998, 9(2): 119-122.
- [27] 李小燕, 刘贤德, 张宏斌, 赵明. 几种云杉属植物叶片提取物的抗氧化性研究. 甘肃农业大学学报, 2014, 49(6): 102-106, 113-113.

- [28] 邹春静, 张远, 刘广田, 段佩山. 沙地云杉根系分布规律的研究//徐文铎, 刘广田. 内蒙古白音敖包自然保护区沙地云杉林生态系统研究. 北京: 中国林业出版社, 1998: 39-41.
- [29] 徐文铎, 郑元润. 沙地云杉苗期生长与干物质生产关系的研究. 应用生态学报, 1993, 4(1): 1-6.
- [30] Zou C J, Han S J, Xu W D. Modular dynamics and structure of *Picea mongolica*. Journal of Wuhan Botanical Research, 2001, 19(5): 369-376.
- [31] 邹春静, 徐文铎, 张远, 刘广田. 沙地云杉的种群构件特征//徐文铎, 刘广田. 内蒙古白音敖包自然保护区沙地云杉林生态系统研究. 北京: 中国林业出版社, 1998: 93-97.
- [32] 郑元润, 徐文铎, 齐淑艳. 沙地云杉种群性状变异的研究//徐文铎, 刘广田. 内蒙古白音敖包自然保护区沙地云杉林生态系统研究. 北京: 中国林业出版社, 1998: 87-92.
- [33] 邹春静, 盛晓峰, 徐文铎, 韩士杰. 沙地云杉生态型同工酶研究. 应用与环境生物学报, 2005, 11(2): 138-140.
- [34] Liu A T, Zou C J, Zhang C, Zheng Y R, Shimizu H, Xu W D. Intraspecific diversity: adaptive differentiation of *Picea mongolica* W. D. Xu ecotypes. Forestry Studies in China, 2011, 13(3): 189-197.
- [35] 王飞, 刘世增, 李得禄. 不同龄沙地云杉光合荧光生理特征的比较. 中国农学通报, 2016, 32(28): 7-10.
- [36] 师生波; 刘克彪, 张莹花, 刘世增, 康才周, 李得禄. 民勤沙生植物园 4 种云杉属植物光化学特性的趋同适应. 生态学报, 2017, 37(15): 5039-5048.
- [37] 黄三祥, 李新彬, 林田苗, 全昌明, 罗菊春, 王立新. 沙地云杉育苗技术及苗木年生长规律研究. 北京林业大学学报, 2003, 25(6): 11-14.
- [38] 周措尤. 半干旱地区沙地云杉播种育苗试验. 防护林科技, 2018, (2): 31-32.
- [39] 郑元润, 张新时, 徐文铎. 沙地云杉种群调节的研究. 植物生态学报, 1997, 21(4): 312-318.
- [40] 郑元润, 徐文铎. 沙地云杉种群稳定性研究. 生态学杂志, 1996, 15(6): 13-16.
- [41] 郑元润, 张新时, 徐文铎. 沙地云杉种群增长预测模型研究. 植物生态学报, 1997, 21(2): 130-137.
- [42] Zou C J, Han S J, Zhou Y M, Xu W D. Population dynamics of *Picea mongolica* in sandy forest steppe ecotone. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2001, 7(6): 517-522.
- [43] 徐文铎, 郑元润. 沙地云杉种群结构与动态的研究. 应用生态学报, 1993, 4(2): 126-130.
- [44] 郑元润. 不同方法在沙地云杉种群分布格局分析中的适用性研究. 植物生态学报, 1997, 21(5): 480-484.
- [45] 邹春静, 徐文铎. 沙地云杉种内、种间竞争的研究. 植物生态学报, 1998, 22(3): 269-274.
- [46] 石鑫, 王朝恩, 刘勇, 姜海燕, 靳善童. 沙地云杉内生真菌分布. 安徽农业科学, 2016, 44(11): 20-22.
- [47] 任燕, 姜海燕, 爱华. 红果型沙地云杉内生真菌多样性. 西北林学院学报, 2018, 33(6): 180-187.
- [48] 白玉娥, 曾超, 彭鹏, 代金玲, 何炎红, 曹欢. 沙地云杉胚性愈伤组织诱导. 分子植物育种, 2015, 13(6): 1363-1368.
- [49] 娄迎春, 郭小兵, 海梅, 白玉娥, 叶冬梅, 杨海峰. 沙地云杉体细胞胚胎发生过程中蔗糖酶活性变化研究. 内蒙古农业大学学报, 2009, 30(2): 66-69.
- [50] 郑元润, 徐文铎. 沙地云杉种群生殖生态及对策研究//徐文铎, 刘广田. 内蒙古白音敖包自然保护区沙地云杉林生态系统研究. 北京: 中国林业出版社, 1998: 115-124.
- [51] 邹春静, 徐文铎, 刘广田. 沙地云杉种群种子雨的时空分布规律. 生态学杂志, 1998, 17(3): 16-19.
- [52] 邹春静, 徐文铎, 张远. 沙地云杉林结实规律的研究//徐文铎, 刘广田. 内蒙古白音敖包自然保护区沙地云杉林生态系统研究. 北京: 中国林业出版社, 1998: 173-177.
- [53] 邹春静, 徐文铎, 刘广田. 沙地云杉林群落类型与动态的研究//徐文铎, 刘广田. 内蒙古白音敖包自然保护区沙地云杉林生态系统研究. 北京: 中国林业出版社, 1998: 165-172.
- [54] Shi J, Shimizu H, Zou C J. Differentiation and population subdivision in *Picea mongolica* based on microsatellite analyses. Biochemical Systematics and Ecology, 2010, 38(6): 1122-1128.
- [55] 刘涛, 张成福, 马国青, 冯林. 沙地云杉林天然更新规律的探讨//徐文铎, 刘广田. 内蒙古白音敖包自然保护区沙地云杉林生态系统研究. 北京: 中国林业出版社, 1998: 178-182.
- [56] 邹春静, 韩士杰, 徐文铎. 生态场理论在沙地云杉种群更新中的应用. 生态学报, 1999, 19(1): 50-54.
- [57] 黄三祥, 罗菊春, 赵秀海. 沙地云杉林天然更新格局及其影响因子的灰关联分析. 林业资源管理, 2009, (5): 64-68, 83-83.
- [58] 邹春静, 张远, 卜军, 刘广田. 沙地云杉林林窗动态的研究//徐文铎, 刘广田. 内蒙古白音敖包自然保护区沙地云杉林生态系统研究. 北京: 中国林业出版社, 1998: 183-187.
- [59] Zou C J, Zhang C, Ma Y L, Xu W D. An environmental gradient change of *Picea mongolica* seedling from the center of a forest canopy gap in forest-steppe ecotone in Inner Mongolia Autonomous Region of China. Journal of Forestry Research, 2006, 17(3): 221-225.
- [60] Zhang C, Zou C J, Peltola H, Wang K Y, Xu W D. The effects of gap size and age on natural regeneration of *Picea mongolica* in the semi-arid region of Northern China. New Forests, 2013, 44(2): 297-310.

- [61] 徐文铎. 内蒙古白音敖包自然保护区沙地云杉林的基本特征、存在问题与解决途径. 生态学杂志, 1993, 12(5): 39-44.
- [62] 邹春静, 徐文铎, 马永亮, 张超. 沙地云杉林植物区系特征的研究. 内蒙古林业科技, 2006, 32(2): 1-4.
- [63] 黄泽东, 杨森, 李建霞, 林秦文, 沐先运, 赵良成. 内蒙古白音敖包自然保护区种子植物多样性及区系研究. 西北植物学报, 2014, 34(3): 614-622.
- [64] Zou C J, Han S J, Xu W D. Formation, distribution, and nature of *Picea mongolica* in China. Journal of Forestry Research, 2001, 12(3): 187-191.
- [65] 徐文铎, 李维典, 郑沅. 内蒙古沙地云杉分类的研究. 植物研究, 1994, 14(1): 59-68.
- [66] 白玉娥, 彭鹏, 王菊, 伊如汗, 段国珍, 林涛. 基于荧光原位杂交技术分析沙地云杉及近缘种核型. 分子植物育种, 2016, 14(12): 3548-3553.
- [67] 蔡萍, 宛涛, 张洪波, 伊卫东, 李方祯, 孟显国, 石小俊. 沙地云杉与近缘种红皮云杉和白扦遗传多样性的 RAPD 分析. 中国农业科技导报, 2009, 11(6): 102-110.
- [68] 郑舒文, 白玉娥, 何炎红, 田有亮. 沙地云杉及其近缘种遗传多样性研究. 福建林业科技, 2015, 42(3): 24-28.
- [69] 李春红, 蓝登明, 周世权, 赵杏花, 邢菊香. 内蒙古白音敖包沙地云杉分类学研究. 干旱区资源与环境, 2008, 22(2): 164-169.
- [70] 段国珍, 白玉娥, 伊如汗, 白淑兰. 沙地云杉与其近缘种间的 GISH 分析. 西北植物学报, 2018, 38(2): 225-231.
- [71] Zou C J, Han S J, Xu W D, Li D T. Vegetation landscape structure and dynamics in sandy forest-steppe ecotone. Journal of Forestry Research, 2003, 14(4): 303-306.
- [72] 邹春静, 徐文铎, 刘广田. 沙地云杉林群落结构特征的研究//徐文铎, 刘广田. 内蒙古白音敖包自然保护区沙地云杉林生态系统研究. 北京: 中国林业出版社, 1998: 153-164.
- [73] 付彩虹, 李钢铁, 胡小龙, 余伟莅. 多伦县沙地云杉混交林物种多样性研究. 内蒙古林业科技, 2012, 38(2): 5-10.
- [74] 刘琴, 杨炜, 蒋明, 安三平, 王丽芳, 王军辉. 沙地云杉容器苗强化育苗技术. 林业实用技术, 2014, (3): 41-43.
- [75] 刘向民, 张国华, 周效明, 王艳军, 张天喜. 沙地云杉造林技术研究初报. 内蒙古林业科技, 2001, 27(3): 27-28, 36-36.
- [76] 包兴华, 方亮. 沙地云杉座水覆膜造林试验. 内蒙古农业大学学报, 2007, 28(4): 102-105.
- [77] 李银科, 刘世增, 康才周, 李得禄, 满多清, 严子柱, 敖尤. 沙地云杉在河西地区的适应性及发展潜力. 水土保持通报, 2017, 37(1): 325-328, 334-334.
- [78] 林文霞, 逯建云, 乌日娜, 任慧兰, 逯振良. 浅谈呼伦贝尔地区沙地云杉引种栽培技术. 中国林业产业, 2017, (4): 217-218.
- [79] 邹春静, 韩士杰, 徐文铎, 谷志静. 沙地云杉幼苗根表土体中 NPK 的梯度分布. 应用生态学报, 2003, 14(12): 2145-2148.
- [80] 刘广田, 邹春静, 齐淑艳, 段佩山. 沙地云杉林生物量与生产力的研究//徐文铎, 刘广田. 内蒙古白音敖包自然保护区沙地云杉林生态系统研究. 北京: 中国林业出版社, 1998: 188-192.
- [81] 邹春静, 卜军, 刘广田, 段佩山. 沙地云杉林凋落物分解速率的研究//徐文铎, 刘广田. 内蒙古白音敖包自然保护区沙地云杉林生态系统研究. 北京: 中国林业出版社, 1998: 193-196.
- [82] 萧刚柔, 王贵成, 伍敦祥. 内蒙云杉扁叶蜂生物学及其防治的初步研究: 森林昆虫论文集(第一集). 北京: 科学出版社, 1959: 234-251.
- [83] 韩静波, 路常宽, 刘广田, 范云中. 云杉腮扁叶蜂幼虫空间分布型的研究//徐文铎, 刘广田. 内蒙古白音敖包自然保护区沙地云杉林生态系统研究. 北京: 中国林业出版社, 1998: 239-241.
- [84] 刘涛, 段佩山, 刘广田. 白音阿扁叶蜂取食期种群动态及防治指标的研究//徐文铎, 刘广田. 内蒙古白音敖包自然保护区沙地云杉林生态系统研究. 北京: 中国林业出版社, 1998: 250-254.
- [85] 张庆贺, Schlyter F, 刘广田. 沙地云杉林重齿小蠹越冬成虫的分布、性比及死亡率//徐文铎, 刘广田. 内蒙古白音敖包自然保护区沙地云杉林生态系统研究. 北京: 中国林业出版社, 1998: 242-247.
- [86] 刘广田. 重齿小蠹越冬调查及防治//徐文铎, 刘广田. 内蒙古白音敖包自然保护区沙地云杉林生态系统研究. 北京: 中国林业出版社, 1998: 248-249.
- [87] 陈国发, 张庆贺, 王艳军, 刘广田, 白永安. 沙地云杉重齿小蠹聚集信息素的试验分析. 东北林业大学学报, 2009, 37(7): 96-98.
- [88] 宋大北, 王艳军, 陈国发, 高永亮, 周效明, 白永安, 李方奇. 沙地云杉球果害虫在树冠上的发生规律研究. 内蒙古林业科技, 2015, 41(4): 32-34, 50-50.
- [89] Schlyter F, Zhang Q H, Liu G T, Ji L Z. A successful case of pheromone mass trapping of the bark beetle *Ips duplicatus* in a forest island, analysed by 20-year time-series data. Integrated Pest Management Reviews, 2001, 6(3/4): 185-196.