

DOI:10.12171/j.1000-1522.20190435



田呈明, 博士, 北京林业大学林学院森林保护学科教授, 博士生导师, 北京林业大学首届教学名师, 北京市教学名师。兼任中国林学会森林病理分会副主任委员, 北京植物病理学会副理事长, 中国植物病理学会常务理事, 国家林业有害生物防治产业技术战略联盟秘书长等。长期从事森林保护学教学与研究工作, 主讲《森林病理学》《植物病原学》《森林病理学研究与实践》等本科生和研究生课程。

主要针对我国重大林业有害生物灾害的成灾机制、流行学和防治技术等开展研究工作, 建立了林木病原菌功能基因研究平台, 系统揭示了杨树炭疽病菌、腐烂病菌、锈病菌与寄主互作的分子病理学机制; 阐明了云杉矮槲寄生害、黄栌枯萎病的发生与成灾机理, 提出了检测与绿色防控技术体系; 从气候、景观层面剖析松材线虫病、杨树腐烂病等重大有害生物发生与扩散的空间分布特征及景观格局耦合机制; 构建了我国林木病原真菌分类学体系, 发现并命名了 60 多个新的(科、属、种)分类单元; 建立了重大外来入侵害虫——枣实蝇的高效应急防控技术体系, 为我国枣产业的健康发展做出了突出贡献。获得陕西省人民政府科技一等奖、梁希林业科学技术二等奖、新疆维吾尔自治区科技进步二等奖各 1 项, 北京市教育教学成果一等奖 2 项; 近 5 年出版专著及教材 5 部; 发表论文 70 余篇; 获国家发明专利 5 项, 行业及地方标准 5 项。获得全国林业专业硕士优秀指导教师等荣誉。

景观复杂性和林分因素对两种土壤条件下 杨树腐烂病发生的混合影响

刘冬萍¹ 林巍巍¹ 熊典广¹ 牛春林² 叶晓芸³ 田呈明¹

(1. 北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 10083; 2. 新疆石油管理局有限公司造林减排作业区, 新疆 克拉玛依 834000; 3. 绿成农业开发有限责任公司, 新疆 克拉玛依 834000)

摘要:【目的】本文探究了不同土壤条件下景观复杂性和林分因素对杨树腐烂病的影响机制, 为合理配置景观格局从而有效控制杨树腐烂病提供理论依据, 促进杨树人工林的可持续发展。【方法】于 2018 年和 2019 年分别调查了新疆维吾尔自治区克拉玛依市和玛纳斯县两种不同的土壤理化性质下杨树腐烂病的发病情况。通过建立广义线性混合效应模型(GLMMs), 以年份为随机效应, 在景观尺度上分析景观复杂性和林分因素对杨树腐烂病的发生影响。【结果】黑杨和新疆杨腐烂病的发生与林分密度和害虫的香农多样性指数呈显著正相关关系, 黑杨腐烂病与第一活枝高有显著正相关关系。两种杨树的腐烂病的发生与非杨树寄主的比例, 以及海拔高度呈负相关关系; 腐烂病与土壤理化性质具有显著相关性, 同一景观结构中, 克拉玛依的病害发病率高于玛纳斯, 而且同一土壤条件下, 简单景观中腐烂病的发病率高于复杂景观。【结论】本研究表明可以通过样地管理和在景观尺度上增强树木抗性来降低杨树腐烂病的发病率, 从而为森林有害生物的管理提供理论依据。在造林规划中要考虑周边的景观结构特征对有害生物的潜在影响。同时利用土地覆被数据长期有效地监管景观特征对杨树腐烂病的影响, 可以达到改善经济和环境效益的目的。

关键词: 腐烂病; 杨树; 人工林; 景观复杂性; 土壤

中图分类号: S792.11; S763.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2019)12-0128-11

收稿日期: 2019-11-19 修回日期: 2019-11-29

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0600105)。

第一作者: 刘冬萍。主要研究方向: 景观生态学与杨树腐烂病的关系研究。Email: 1661508122@qq.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学林学院。

责任作者: 田呈明, 博士, 教授。主要研究方向: 林木病理学。Email: chengmt@bjfu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

引文格式: 刘冬萍, 林巍巍, 熊典广, 等. 景观复杂性和林分因素对两种土壤条件下杨树腐烂病发生的混合影响 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(12):128–138. Liu Dongping, Lin Weiwei, Xiong Dianguang, et al. Mixed effects of landscape complexity and stand factors on cytospora canker of poplar across two different field soil conditions[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(12): 128–138.

Mixed effects of landscape complexity and stand factors on cytospora canker of poplar across two different field soil conditions

Liu Dongping¹ Lin Weiwei¹ Xiong Dianguang¹ Niu Chunlin² Ye Xiaoyun³ Tian Chengming¹

(1. Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education,

Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. The Afforestation Emission Reduction Operation Area of Xinjiang Petroleum

Administration Co., LTD, Karamay 834000, Xinjiang, China;

3. Karamay Lücheng Agricultural Development Co., Ltd, Karamay 834000, Xinjiang, China)

Abstract: [Objective] This paper explores the influence mechanism of landscape complexity and stand factors on cytospora canker of poplar caused by *Cytospora chrysosperma* across two different field soil conditions, to provide theoretical basis for rational allocation of landscape patterns to control cytospora canker effectively, and to further develop sustainable poplar (*Populus* spp.) plantations. [Method] We spent 2 years (2018–2019) collecting cytospora canker data across two different soil physical and chemical properties in Xinjiang Uygur Autonomous Region of wester China: one in Karamay City and another in Manasi County. Using general linear mixed effect models (GLMMs) with the random effect of year to analyze how the landscape complexity and stand factors influence cytospora canker at landscape scale. [Result] Results showed that the cytospora canker of *Populus nigra* and *P. alba* var. *pyramidalis* both had significantly positive relationships with tree density, as well as the Shannon diversity index of pests. Compared with *P. alba* var. *pyramidalis*, *P. nigra* had a significant relationship with the height of first live branch. The cytospora canker of the two tree species was both correlated negatively with the proportion of non-poplar hosts, as well as elevation. The cytospora canker had a significant correlation with physical and chemical properties of soil, in the same landscape structure, the disease incidence in Karamay City was higher than that in Manasi County. Under the same soil conditions, the incidence of cytospora canker in simple landscape was higher than that in complex landscape. [Conclusion] Overall, our study shows that the occurrence of cytospora canker on poplar can be reduced via management of habitats and enhanced tree resistance at landscape scale, and provides valuable contributions to landscape research and for managing outbreaks of insects and pathogens. In afforestation planning, the potential impact of the surrounding landscape structure on insects and pathogens should be considered. The effects of landscape features on cytospora canker of poplar can be monitored on a large scale and over long periods of time using land cover data to improve economic and environmental benefits.

Key words: cytospora canker; poplar; plantation; landscape complexity; soil

近年来, 由于对林业生态系统的忽视与低估^[1], 导致人类在不断的扩张与过度开发过程中, 加速了森林的退化^[2]。随着林木缺失对生物多样性、生态系统以及人类发展产生重大威胁逐渐加强, 林木修复也迫在眉睫^[3]。现今森林生态系统的恢复工作, 如人工林, 通常是大面积种植单一森林物种, 而由于全球气候变化以及人类的频繁干扰, 这些地区正日益受到外来传入的有害生物的威胁, 从而增加了大面积

爆发病虫害的概率^[4–6]。但是, 对森林病虫害爆发产生影响的并非只有气候和人为因素^[7]。一般认为, 与半自然生境相结合的景观复杂性可以使有害生物和寄主之间相互作用的生态过程保持相对稳定^[8]。景观复杂性可以强化植物资源的异质性(例如, 生境多样性)和保护生物多样性, 并可能有助于恢复和保护自然或半自然生境^[9–10], 更重要的是, 它还能够加强对有害生物的生物控制, 同时使寄主的抗性更加稳

定^[11]。在一个寄主群落中,寄主与病原体的接触率往往取决于病原体的繁殖力和生命力和寄主的易感性以及周围的景观结构^[12-13]。即景观复杂性会影响病原菌的定殖、扩散和传播速率^[14-16]。之前,多数关于景观复杂性的实践与理论研究主要还是集中于农田环境中的害虫与天敌、生物多样性、生物防治以及半自然生境中的昆虫^[17-22],极少有关于林木病害方面的研究^[8,23]。

目前,我国高度重视生态环境建设,人工林的面积居世界之最,2018年大概有6 933万 hm^2 。杨树(*Populus* spp.)由于其优良的生物学特性,被广泛的用于木材生产(如,工业应用、纸张和家具)、环境保护(如防护林、固碳和防风)以及农田系统(如农田防护林)^[4,24-25]。2016年全球的杨树人工林面积约有3 140万 hm^2 ,其中中国占最大比例,所以杨树人工林在经济和生态发展中发挥了关键作用^[26-27]。然而,杨树人工林的发展却受到了多种不利因素的制约。一方面,杨树的各部分结构都可遭受病虫害的侵袭^[28]。另一方面,大面积的单一种植造成的景观简化增加了有害生物可用资源的集中度^[29-31]。在众多的杨树病虫害中,由金黄壳囊孢(*Cytospora chrysosperma*)引起的杨树腐烂病较为严重,造成树干和枝条的腐烂,严重时会导致树木死亡。

因此,我们可以通过改善样地管理和在景观尺度上增强树木抗性来降低杨树腐烂病的严重程度^[32]。为了提高杨树人工林在林业生态恢复中的作用,本文研究的主要目的是探究在中国新疆维吾尔自治区的克拉玛依市和玛纳斯县两种不同的土壤理化性质下,景观复杂性和林分因素如何影响杨树腐烂病的发生蔓延。景观复杂性主要通过划分样地的

林分类型(纯林或混交林),并在以样地为圆心,半径为250 m的范围内(已证明同500 m、1 000 m的景观尺度相比,250 m的景观尺度与腐烂病的关系最为显著,未发表)来了解景观复杂性和潜在的林分因素与杨树腐烂病发生的相互关系,从而更好地分析林分因素和景观特征对腐烂病的影响。这对于优化管理措施的有效性起着至关重要的作用,为腐烂病的防控提供新的策略,从而改善经济和环境效益。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

第一个研究区位于新疆克拉玛依市($84^{\circ}44' \sim 86^{\circ}01'E$, $44^{\circ}07' \sim 46^{\circ}08'N$),其地形呈斜条状,南北长东西窄^[33],整体地貌偏沙漠化,土壤贫瘠,盐碱化严重。克拉玛依市位于中纬度内陆地区,属于典型的温带大陆性气候。冬季寒冷,夏季炎热,年平均气温为 8.6°C ,昼夜温差较大^[34]。年平均降水量 $94 \sim 187 \text{ mm}$,蒸发量 $1\,800 \sim 2\,700 \text{ mm}$ ^[35]。由于气候和土壤的特殊性,克拉玛依市的林木主要由人工种植的片林(如新疆杨(*Populus alba* var. *pyramidalis*)、俄罗斯杨(*P. russkii*),无箭杆杨(*P. var. thevestina*))、绿化带、农田防护林以及西北地区的天然树种胡杨林(*P. euphratica*)组成。因此,杨树受到人为干预的严重影响,甚至完全依赖于人工管理(如浇水、除草、打药等)。这些人为活动对杨树优势种的比例和空间分布有显著的影响,常常导致景观格局的变化。样地主要分布在以杨树和榆树为主的速生林及农田防护林的人工碳汇林基地内(图1),梭梭(*Haloxylon ammodendron*)—红柳(*Tamarix ramosissima*)作为初始植被的沙漠环境已被大面积的森林和农田所取

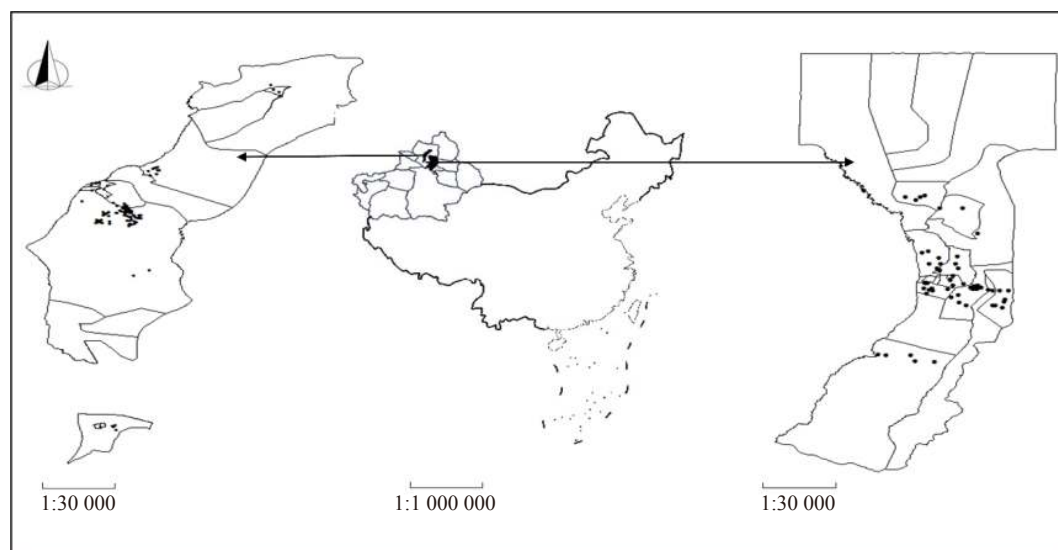


图1 克拉玛依市(左)和玛纳斯县(右)的样地分布图

Fig. 1 Spatial distribution of poplar plots in Karamay City (left) and Manasi County (right) of northwestern China

代,面积约 3 000 hm²[36]。

另一个研究区位于新疆玛纳斯县(85°41'~86°43'E, 43°28'~45°38'N),包含 3 种景观区域(图 1),即南部天山丘陵区的夏季牧场,中部是冲积平原的粮食产区,北部是古尔班通古特沙漠的一部分[37]。玛纳斯也属于温带大陆性气候,年平均气温 7.2℃,降水量 115.8~200 mm,年平均蒸发量 1 500~2 100 mm[38-39]。与克拉玛依相比,玛纳斯自然资源丰富,植被覆盖率较高,主要杨树品种有新疆杨、俄罗斯杨和箭杆杨。

1.2 杨树腐烂病的调查

在 2018 和 2019 年的 5—9 月分别对克拉玛依和玛纳斯的杨树片林及农田防护林进行了腐烂病的调查。利用 Arcgis 随机生成的点在研究区内设置 40 m × 40 m 的样地(2018 年样地数量 80 块,2019 年新增样地数量 85 块)对杨树腐烂病的发生情况展开调查(相邻样地之间至少间隔 300 m)。以杨树树干具有橙红色且细长呈卷丝状的分生孢子,树皮糟乱成丝状并有酒糟气味作为鉴别腐烂病发生的主要依据。以胸径大于 5 cm 的树木作为有效调查对象[40],每块样地进行每木调查,记录样地中感染和未感染杨树腐烂病树木的数量,样地距离任何森林边缘至少 5 m 以减少边缘效应[41]。

1.3 其他变量的调查

利用 GPS(全球定位系统)在每块样地的中心记

录地理坐标和海拔,分析地势因素对杨树腐烂病的影响。每块样地沿着两条对角线随机选取 5~8 棵树,测量胸径(DBH)、树高以及第一活枝高(从树干基部到第一个活枝的高度),计算样地的平均胸径、平均树高以及平均第一活枝高。记录每块样地中非寄主或替代寄主的比例,如沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)、榆树(*Ulmus pumila*)等植被信息,并记录各样地的林分密度。由于害虫为害会降低树势从而增加病原菌入侵的概率,因此对为害严重的杨盾蚧(*Diaspidiotus slavonicus*)等枝干害虫,杨潜叶蛾(*Leucoptera susinella*)、杨细叶蛾(*Lithocolletis populifoliella*)等食叶害虫的虫口密度等进行了调查。在样地的每条对角线上随机选择 5 棵杨树,在每棵树中部与下部的东、南、西、北 4 个方向各剪取 1 条树枝,每条树枝从基部到上部约 50 cm 内随机记录 5 个 1 cm² 中的杨盾蚧数量[42],同时记录枝条上 50 cm 内食叶害虫的危害状及头数。多样性的计算公式如下:

香浓多样性指数[43] (e-base, SHDI): $SHDI = -\sum_{i=1}^S p_i \ln p_i$

辛普森多样性指数[44]: $p_i^2 = \frac{n_i(n_i - 1)}{N(N - 1)}$

式中: S 为每块样地的害虫种类数; $p_i = n_i/N$, 其中 n_i 为单个物种数量, N 为所有物种的数量。克拉玛依和玛纳斯的土壤理化性质如(表 1、2)所示。

表 1 克拉玛依研究区的土壤理化性质平均变量

Tab. 1 Mean variables of soil physical and chemical properties at Karamay City research area

项目 Item	土壤理化性质 Physical and chemical properties of soil	0~10 cm	10~30 cm	30~50 cm
荒漠林 Desert forests[45]	有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹)	2.29	1.30	1.80
	有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹)	4.79	3.98	3.89
	有效磷 Available phosphorus/(mg·kg ⁻¹)	5.79	5.02	4.41
	全磷 Total phosphorus/(g·kg ⁻¹)	0.69	0.69	0.58
	有效氮 Available nitrogen/(mg·kg ⁻¹)	7.63	6.81	6.54
人工林 Plantation forests[46]	全氮 Total nitrogen/(g·kg ⁻¹)	0.10	0.10	0.58
	pH值 pH value	8.67	8.76	8.71
	有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹)	8.41	7.13	6.59
	土壤密度 Soil density/(g·cm ⁻³)	1.62	1.64	1.66
	土壤水分 Soil moisture/%	12.08	13.77	13.94

注:表中数据引自参考文献[45-46]。Note: the data in the table is quoted from the references [45-46].

1.4 景观特征

在 ENVI 5.3 经大气校正和辐射融合后, Landsat 8 遥感图像用于对研究区域内的土地覆盖类型进行非监督分类,大致可分为 6 种景观类型:林地(如杨树林)、农田(如瓜地,棉花(*Malvaceae gossypium*)和玉米地(*Zea mays*))、草地、水域(人工林分布的消防水

池)、建筑物(如居民地)和裸地(如道路和荒漠地)。根据坐标,利用 Arcgis 以每块样地为中心设置半径为 250 m 的景观尺度。景观复杂度的分析需要对土地利用类型的排列和组成进行量化,这必须满足以下所有标准:(i)样地是混交林;(ii)样地周围景观至少包括 3 种其他土地利用类型组成的广泛而密集的

表 2 玛纳斯研究区的土壤理化性质平均变量
Tab. 2 Mean variables of soil physical and chemical properties at Manasi County research area

土壤理化性质 Physical and chemical properties of soil	0~10 cm	0~20 cm	20~30 cm
有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹)	11.44		
全磷 Total phosphorus/(g·kg ⁻¹)	0.53		
全氮 Total nitrogen/(g·kg ⁻¹)	1.98		
全钾 Total potassium/(g·kg ⁻¹)	24.22		
有效氮 Available nitrogen/(mg·kg ⁻¹)		41.75	
有效磷 Available phosphorus/(mg·kg ⁻¹)		8.53	
有效钾 Available potassium/(mg·kg ⁻¹)		233.26	
pH值 pH value		8.57	
土壤水分 Soil moisture/%	14.16	17.96	18.86
盐分 Salinity/(g·kg ⁻¹)	6	6.66	7.87

注:表中数据引自参考文献[47-49]。Note: the data in the table is quoted from the references [47-49].

非林地斑块;(iii)半径 250 m 的缓冲区内非林地面积占 50% 以上。

1.5 数据分析

将年份作为随机效应,通过建立广义线性混合效应模型-二项分布(GLMMs)来验证病害和解释变量之间的关系。每块样地的患病树木数量和总树木数量作为腐烂病发生概率的响应变量。由于解释变量间数值的差异性,将解释变量进行 log10(x + 1)的标准化转换^[50]。为避免过度拟合,对变量进行了 Spearman 相关系数分析^[51],剔除了高度相关变量:树高、胸径、郁闭度和 Simpson 指数。用方差膨胀因子准则(VIFs)检验模型中解释变量之间的共线性,以 VIF 小于 2 表明数据没有共线性问题^[11]。通过 Akaike 的信息准则(AIC)和以下两个准则判断最佳模型:(1)AICc 的一组校正样本;(2)AICc 的 delta 值即 ΔAICc < 2。AICc 值按照从小到大将模型从最佳到最差进行排序,ΔAICc 是模型的 AICc 与最低 AICc 值即最佳模型之间的差异,我们使用多模型推理,并根据小样本校正后的 AICc 值比较最佳模型^[52]。当最佳模型的样本得到有力支持时,与最低 AIC 模型相比,delta AIC 值小于 2。以上需要通过模型平均来完成(在顶部模型集中,用于量化模型中与每个变量相关联的 akaike 权重之和),该方法减少了模型选择偏差,适合于确定哪个因素对响应变量的影响最大^[53]。P 值基于模型平均和标准误差。所有统计分析均在 R[3.5.3] 进行,混合效应在 lme4 包^[54]中进

行,模型平均在 MuMIn 和 Mass 包中进行^[55]。

2 结果与分析

2.1 研究区的腐烂病发生情况

通过调查统计发现,两个地区杨树腐烂病发病率的范围为 0 ~ 84.62%。其中克拉玛依研究区俄罗斯杨的平均发病率为(6.9 ± 0.96)%(平均值 ± 标准误),新疆杨的平均发病率为(10.26 ± 3.39)%。玛纳斯研究区俄罗斯杨的平均发病率为(6.54 ± 4.75)%,箭杆杨的平均发病率为(8.53 ± 1.75)%,新疆杨的平均发病率为(5.46 ± 4.94)%。在 80 个俄罗斯杨样地中腐烂病的平均发病率为(6.83 ± 1.16)%,33 个新疆杨样地中腐烂病的平均发病率为(8.81 ± 2.86)%,52 个箭杆杨样地中腐烂病的平均发病率为(8.53 ± 1.75)%。由于俄罗斯杨和箭杆杨发病率之间的 t 检验无显著差异(t = - 0.473, df = 131, P = 0.637),而且两者均为黑杨的变种,故将两个树种合并为黑杨进行腐烂病的分析。

2.2 解释变量对新疆杨腐烂病的发生影响

通过模型分析,可以得出新疆杨的腐烂病与第一活枝高无显著关系(P = 0.154, 表 3),但是与林分密度关系显著(P = 0.002, 表 3、图 2a),且密度的相对重要性为 1。腐烂病与害虫的香浓多样性指数呈显著正相关(P < 0.001, 表 3、图 2b),大部分有害生物可对树木产生危害,降低树势。海拔可有效预测腐烂病的发生情况(P < 0.001, 表 3、图 3a)。病害与非寄主比例有显著负相关关系(P < 0.001, 表 3、图 3b)。与此同时,景观复杂性对腐烂病也有显著影响(P < 0.001, 表 3),研究区的土壤理化性质对病害同样也有影响(P = 0.037, 表 3)。

2.3 解释变量对黑杨腐烂病的发生影响

经过模型分析,黑杨的腐烂病与林分密度呈显著正相关(P < 0.001, 表 4、图 4a),有害生物多样性的增加会促进病害的发生蔓延(P < 0.001, 表 4、图 4b)。海拔与腐烂病有显著负相关关系(P = 0.01, 表 4、图 5a),同时,非寄主比例对腐烂病有显著影响(P < 0.001, 表 4、图 5b)。腐烂病与第一活枝高有正相关关系(P < 0.001, 表 4、图 5c),腐烂病在不同景观结构中表现出差异(P = 0.046, 表 4),土壤理化性质对腐烂病的影响效果显著(P < 0.001, 表 4)。

2.4 土壤不同的理化性质中景观复杂性对腐烂病的影响

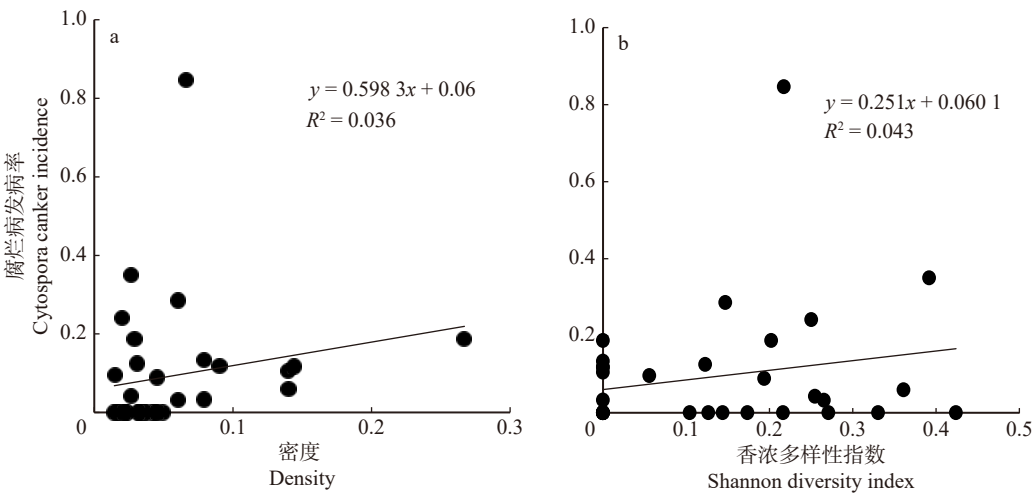
在景观尺度上,不同景观类型中,新疆杨在克拉玛依(土壤理化性质相对较差)腐烂病的发病率要高于玛纳斯(土壤理化性质相对较好)的发病率,在同一土壤条件中,病害发生率在景观类型简单的林地

表 3 模型平均后各解释变量对新疆杨腐烂病的影响

Tab. 3 Results of the model averaging procedure to assess the relationship between *P. alba* var. *pyramidalis* canker and explanatory variables

变量 Variable	估计值 Estimated value	标准误 SE	z值 z value	P	重要值 Importance	变量所在模型数量 Number of models containing variable
第一活枝高 Height of the first live branch	- 0.954 9	0.639 1	1.427	0.154	1	64
密度 Density	6.919 1	2.176 1	3.084	0.002**	1	64
香浓多样性指数 Shannon diversity index	3.120 8	0.847 2	3.519	< 0.001***	1	64
非寄主比例 Proportion of non-hosts	- 4.097 2	1.187 4	3.314	< 0.001***	1	64
海拔 Elevation	- 12.379 2	2.135 1	5.536	< 0.001***	0.97	64
土壤理化性质 Soil physical and chemical property	0.651 7	0.298 0	2.084	0.037*	1	64
景观复杂性 Landscape complexity	2.146 0	0.318 3	6.428	< 0.001***	0.7	64

注: *表示 $P < 0.05$; **表示 $P < 0.01$; ***表示 $P < 0.001$ 。下同。Notes: * means $P < 0.05$; ** means $P < 0.01$; *** means $P < 0.001$. Same as below.



腐烂病发病率为样地患病树木数量/样地树木总量。下同。Cytospora canker incidence of poplar is the number of diseased trees in the plot/the total number of trees in the plot. Same as below.

图 2 新疆杨腐烂病与林分密度(a)和香浓多样性指数(b)的关系

Fig. 2 Relationship between *P. alba* var. *pyramidalis* canker and (a) tree density and (b) Shannon diversity index

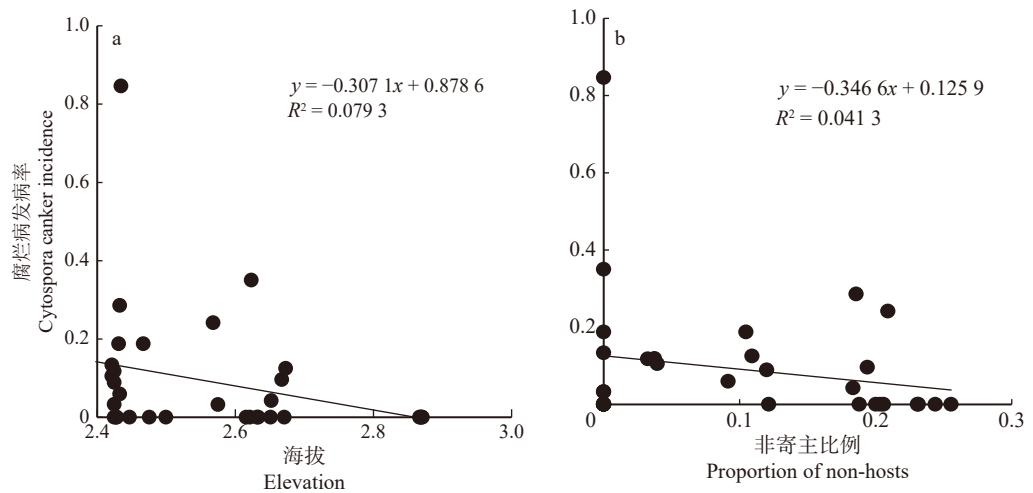


图 3 新疆杨腐烂病与海拔(a)和非寄主比例(b)的关系

Fig. 3 Relationship between *P. alba* var. *pyramidalis* canker as well as (a) elevation and (b) the proportion of non-hosts

中要高于景观类型复杂的林地(图 6)。在某一个特定的景观条件中, 尽管景观结构复杂, 但克拉玛依黑杨腐烂病的发病率要比玛纳斯更为严重(图 7)。

表 4 模型平均后各解释变量对黑杨腐烂病的影响

Tab. 4 Results of the model averaging procedure to assess the relationship between *P. nigra* canker and explanatory variables

变量 Variable	估计值 Estimated value	标准误 SE	z 值 z value	P	重要值 Importance	变量包含模型数 Number of models containing variable
第一活枝高 Height of the first live branch	0.759 4	0.174 7	4.305	< 0.001***	0.33	64
密度 Density	6.612 5	0.748 7	8.747	< 0.001***	1	64
香浓多样性指数 Shannon diversity index	2.620 0	0.462 1	5.615	< 0.001***	0.99	64
非寄主比例 Proportion of non-hosts	- 1.752 0	0.417 0	4.161	< 0.001***	1	64
海拔 Elevation	- 2.257 7	0.874 4	2.564	0.010*	1	64
土壤理化性质 Soil physical and chemical properties	- 0.432 0	0.118 4	3.615	< 0.001***	0.68	64
景观复杂性 Landscape complexity	0.325 1	0.164 0	1.964	0.046*	1	64

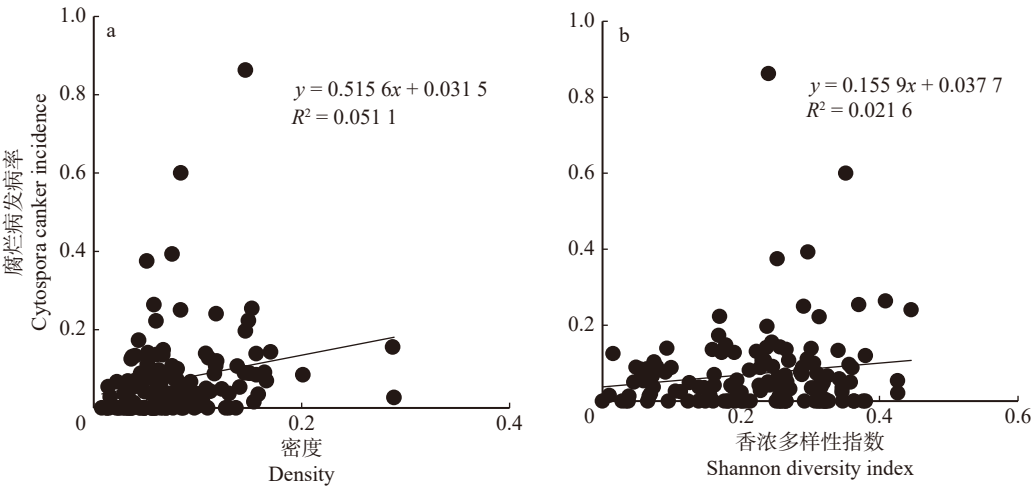


图 4 黑杨腐烂病与林分密度(a)和香浓多样性指数(b)的关系

Fig. 4 Relationship between *P. nigra* canker and tree density (a) as well as Shannon diversity index (b)

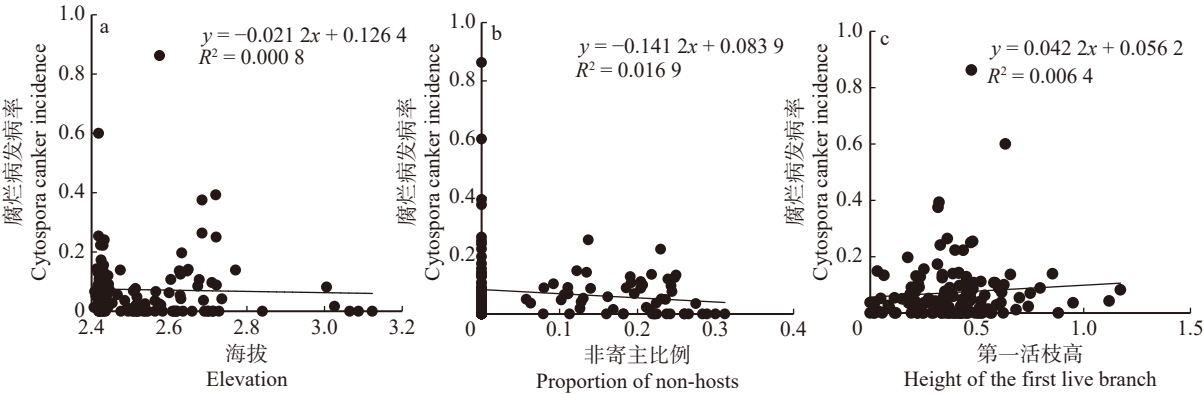


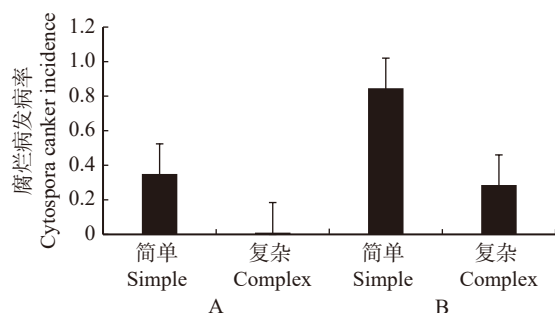
图 5 黑杨腐烂病与海拔(a)和非寄主比例(b)以及第一活枝高(c)的关系

Fig. 5 Relationship between *P. nigra* canker and elevation (a), the proportion of non-hosts (b) as well as the first live branch (c)

3 讨 论

在本研究中,我们发现所有的解释变量均可有效预测杨树腐烂病。林分密度是生态系统一个重要的结构和功能因子,新疆杨和黑杨腐烂病的发生均与林分密度有显著正相关关系^[56]。林分生产力与密度的关系趋势不明显,林分密度较大的样地往往郁

闭度较高,通风不良,树势较弱^[57],使树木变得易感,而且高密度林地会为病原菌创造良好的侵染条件。因而在植树造林中,应注意树木的种植密度或后期进行人工疏伐以此来建立具有生态系统功能的生态林^[58]。腐烂病与害虫的香浓多样性指数有显著正相关关系,有害生物的增多同样危害林分健康,影响树势,降低对病原菌的抵抗力。也从另一方面说明景



复杂景观表示非林地面积 > 50%，样地是混交林；简单景观则相反。A. 玛纳斯土壤条件；B. 克拉玛依土壤条件。下同。Complex landscape refers to the cumulative proportion of non-forests > 50% and the sample plot is mixed forest, simple landscape is the reverse. A, Manasi soil conditions; B, Karamay soil conditions. Same as below.

图 6 新疆杨腐烂病在不同土壤条件及 250 m 的景观结构中的发生情况

Fig. 6 *P. alba* var. *pyramidalis* canker incidence in landscape structures across two different soil conditions at 250 m spatial scale

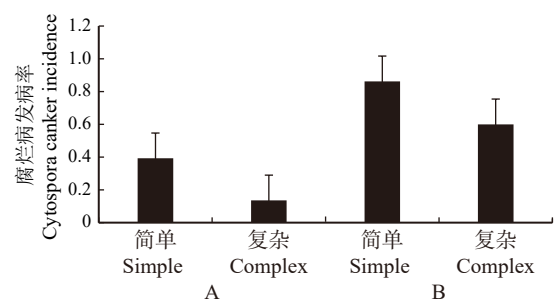


图 7 黑杨腐烂病在不同土壤条件及 250 m 的景观结构中的发生情况

Fig. 7 *P. nigra* canker incidence in landscape structures across two different soil conditions at 250 m spatial scale

观配置的重要性，合理的景观规划不仅会加强对有害生物的生物控制，还会对捕食和天敌、传粉等昆虫活动产生积极的效应^[59]。

海拔是塑造景观的驱动力，从而会影响生物和非生物过程^[60]。本文中，海拔与腐烂病有显著负相关关系。低海拔区域，杨树遭受的生理胁迫较多，温度等条件适宜病原菌侵染为害，随着海拔的升高可能会使温度或其他微气候条件产生变化，从而不利于病原菌的侵染。这一结果与 Van 等^[61]对板栗疫病的研究结果相反，尽管海拔范围与我们的研究几乎相同，但是板栗疫病与海拔高度呈正相关关系。当非寄主的比例增加，腐烂病发生率降低，所以减少单一树种的种植可以有效抑制病害，同时，增加混交林的比例可以增加物种多样性，不仅可以降低病原菌侵染目标寄主的几率，还可以有效控制有害生物，提高林分树势^[29,62-63]。同新疆杨不同的是，黑杨与第一活枝高有正相关关系，说明随着第一活枝高度的增加，病原菌在林分内部的积聚数量与流动速度增加，

加大了病原菌与寄主的接触率，加重侵染。

根据不同土壤条件下森林的景观复杂性，复杂的林分景观可能会减轻杨树腐烂病的发生率和严重性。“中等程度复杂的景观假说”已被证明可以保持林分抗性以及承担其他生态功能^[64-65]。这个假说同时也建议不同群落间的交互相错对病虫害的抑制和对其他干扰的抵抗是非常重要的^[66]。所以适当增加景观复杂性，即合理安排非单一生境，会提供除抑制病虫害以外的多种生态系统服务功能^[67]，如改善土壤结构、水渗透以及减少侵蚀^[68]。因此，应用较为完整的生态相互作用的综合方法从景观角度合理安排林分格局，从而有效控制有害生物。不同的土壤条件会影响病害的发生，针对土壤理化性质低下的林地可以增加林下植被的覆盖度，如一些抗盐耐旱植物，可以改善土壤条件，增加土壤肥力^[69]。

目前，中国人工林的碳储存量只有自然林的 20%^[70]，森林覆盖率仍远低于 31% 的全球平均水平，森林资源稀少，生态脆弱。环境胁迫（如土壤侵蚀、污染、外来有害生物）随着气候变化的复合效应（如二氧化碳浓度的上升）的增加，景观角度栽培和培育杨树可以为人工林提供育种和栽培的新技术和知识^[4,71]。控制林分密度或后期进行人工疏伐，能够增加非寄主乔木的比例，如种植混交林，以此增加林分多样性，形成景观异质性。林分也可以通过降低寄主林木间的连通性（如榆树、沙枣等）增加非寄主树种的多样性。随着非寄主比例的增加，目标寄主被侵染的几率降低，同时，相关的林分抗病性也会随着林分多样性的增加而提高^[72-73]。此外，半自然生境中景观复杂性的增加会促进自然天敌对虫害的生物控制^[74-76]，从而维持林分树势，减少次生病害的侵染风险。林下发展草本植被，改善土壤的理化性质，增加土壤肥力。将重点放在传播途径和来源上，如在新的区域加强林木检疫，严格的植物检疫措施可以降低或抑制有害生物在新环境中的传播速度^[77-79]。寻找可行、有效的防治策略来实施杨树腐烂病的防治规划是非常重要的，结合这些信息，可以对我国杨树腐烂病的防治进行更全面的评估。但是，仍然迫切需要对复杂景观结构内的多种生态过程进行实验研究，以评估多种森林病害。

4 结 论

本研究中，通过在 250 m 的景观尺度中分析发现，不同土壤条件下的杨树人工林中，杨树腐烂病的发生程度在不同树种之间的差异不大，均与景观复杂性、林分因素有显著相关性，林分密度、第一活枝高、非寄主乔木比例等林分因素结合景观结构特征

可以反应杨树腐烂病的发生严重程度。

参 考 文 献

- [1] Vira B, Agarwal B, Jamnadas R H, et al. Forests, trees and landscapes for food security and nutrition[M]. Cambridge: Open Book Publishers, 2015.
- [2] Brockerhoff E G, Jactel H, Parrotta J. A. Role of eucalypt and other planted forests in biodiversity conservation and the provision of biodiversity-related ecosystem services[J]. *Forest Ecology and Management*, 2013, 301: 43–50.
- [3] Sukhdev P, Wittmer H, Schröter-Schlaack C, et al. The economics of ecosystems and biodiversity: mainstreaming the economics of nature: a synthesis of the approach, conclusions and recommendations of TEEB[M]. Ginebra (Suiza): Progress Press, 2010.
- [4] Ball J, Carle J, Del L A. Contribution of poplars and willows to sustainable forestry and rural development[J/OL]. UNASYLVA-FAO-, 2005, 56 (2): 3 [2019–05–30]. <http://www.fao.org/tempref/docrep/fao/008/a0026e/a0026e03.pdf>.
- [5] Kraeuchi N. Potential impacts of a climate change on forest ecosystems[J]. *European Journal of Forest Pathology*, 1993, 23(1): 28–50.
- [6] Wingfield M J, Brockerhoff E G, Wingfield B D, et al. Planted forest health: the need for a global strategy[J]. *Science*, 2015, 349: 832–836.
- [7] Condeso T E, Meentemeyer R K. Effects of landscape heterogeneity on the emerging forest disease sudden oak death[J]. *Journal of Ecology*, 2007, 95(2): 364–375.
- [8] Mundt C C, Sackett K E, Wallace L D. Landscape heterogeneity and disease spread: experimental approaches with a plant pathogen[J]. *Ecological Applications*, 2011, 21(2): 321–328.
- [9] Medeiros H R, Hoshino A T, Ribeiro M C, et al. Landscape complexity affects cover and species richness of weeds in Brazilian agricultural environments[J]. *Basic and Applied Ecology*, 2016, 17(8): 731–740.
- [10] Hendrickx F, Maelfait J P, Van W W, et al. How landscape structure, landuse intensity and habitat diversity affect components of total arthropod diversity in agricultural landscapes[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2007, 44: 340–351.
- [11] Schirmel J, Albrecht M, Bauer P M, et al. Landscape complexity promotes hoverflies across different types of semi-natural habitats in farmland[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2018, 55(4): 1747–1758.
- [12] Ostfeld R S, Keesing F, Eviner V T. Infectious disease ecology: effects of ecosystems on disease and of disease on ecosystems [M]//McCallum H. Landscape structure, disturbance, and disease dynamics. New Jersey: Princeton University Press, 2008: 100–122.
- [13] Padgett G E, Hopkins R L. Landscape epidemiology of *Batrachochytrium dendrobatidis* in central California[J]. *Ecography*, 2010, 33(4): 688–697.
- [14] With K A. The landscape ecology of invasive spread[J]. *Conservation Biology*, 2002, 16(5): 1192–1203.
- [15] Holdenrieder O, Pautasso M, Weisberg P J, et al. Tree diseases and landscape processes: the challenge of landscape pathology[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2004, 19(8): 446–452.
- [16] Ostfeld R S, Glass G E, Keesing F. Spatial epidemiology: an emerging (or re-emerging) discipline[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2005, 20(6): 328–336.
- [17] Batáry P, Báldi A, Szél G, et al. Responses of grassland specialist and generalist beetles to management and landscape complexity[J]. *Diversity and Distributions*, 2007, 13(2): 196–202.
- [18] Rusch A, Bommarco R, Jonsson M, et al. Flow and stability of natural pest control services depend on complexity and crop rotation at the landscape scale[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2013, 50(2): 345–354.
- [19] Yang L, Zhang Q, Liu B, et al. Mixed effects of landscape complexity and insecticide use on ladybeetle abundance in wheat fields[J]. *Pest Management Science*, 2019, 75(6): 1638–1645.
- [20] Chaplin R, Rourke M E, Blitzer E J, et al. A meta-analysis of crop pest and natural enemy response to landscape complexity[J]. *Ecology Letters*, 2011, 14(9): 922–932.
- [21] Norton L, Johnson P, Joys A, et al. Consequences of organic and non-organic farming practices for field, farm and landscape complexity[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 129(1–3): 221–227.
- [22] Winqvist C, Bengtsson J, Aavik T, et al. Mixed effects of organic farming and landscape complexity on farmland biodiversity and biological control potential across Europe[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2011, 48(3): 570–579.
- [23] Plantegenest M, Le M C, Fabre F. Landscape epidemiology of plant diseases[J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2007, 4(16): 963–972.
- [24] Christersson L. Poplar plantations for paper and energy in the south of Sweden[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2008, 32(11): 997–1000.
- [25] Fang S, Xue J, Tang L. Biomass production and carbon sequestration potential in poplar plantations with different management patterns[J]. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85(3): 672–679.
- [26] Lovarelli D, Fusi A, Pretolani R, et al. Delving the environmental impact of roundwood production from poplar plantations[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 645: 646–654.
- [27] Wang Y, Bai G, Shao G, et al. An analysis of potential investment returns and their determinants of poplar plantations in state-owned forest enterprises of China[J]. *New Forests*, 2014, 45(2): 251–264.
- [28] Ma Z, Zhu J, Sun Z, et al. The influences of biotic and abiotic factors on the occurrence and severity of poplar canker disease in Qingfeng County, China and the management implications[J]. *Journal of Forestry Research*, 2015, 26(4): 1025–1034.
- [29] Ennos R A. Resilience of forests to pathogens: an evolutionary ecology perspective[J]. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 2014, 88(1): 41–52.

- [30] Steenackers J, Steenackers M, Steenackers V, et al. Poplar diseases, consequences on growth and wood quality[J]. *Biomass and Bioenergy*, 1996, 10(5-6): 267-274.
- [31] Wang G, Dong Y, Liu X, et al. The current status and development of insect-resistant genetically engineered poplar in China[J/OL]. *Frontiers in Plant Science*, 2018 [2019-05-30]. http://people.dyu.edu.tw/paper/9805530_e.pdf.
- [32] Yi H W, Chi Y J. Biocontrol of cytospora canker of poplar in north - east China with trichoderma longibrachiatum[J]. *Forest Pathology*, 2011, 41(4): 299-307.
- [33] 潘峰, 田长彦, 邵峰, 等. 新疆克拉玛依市生态敏感性研究[J]. *地理学报*, 2011, 66(11): 1497-1507.
- Pan F, Tian C Y, Shao F, et al. Study on the ecological sensitivity of Karamay City in Xinjiang[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(11): 1497-1507.
- [34] 岳璐. 干旱地区节水型公路植物景观设计规划研究:以克拉玛依市为例[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(7): 299-302, 308.
- Yue L. Study on plant landscape design and planning of water-saving highway in arid area: Taking Karamay City as an example[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(7): 299-302, 308.
- [35] 钟玉婷, 范子昂, 刘新春, 等. 克拉玛依大气降水化学组分及来源分析[J]. *干旱区地理*, 2019, 42(5): 1038-1047.
- Zhong Y T, Fan Z, Liu X C, et al. Chemical Characteristics and Source Assessment of Atmospheric Precipitation in Karamay[J]. *Arid Area Geography*, 2019, 42(5): 1038-1047.
- [36] 黄聪. 克拉玛依人工林景观格局变化与气候因子关系分析 [D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2010.
- Huang C. Analysis of the relationship between landscape pattern change and climatic factors of Karamay plantation area[D]. Urumchi: Xinjiang University, 2010.
- [37] 轩俊伟, 盛建东. 2001—2017 年新疆玛纳斯河流域植被 NDVI 时空变化特征[J]. *林业资源管理*, 2018, 6(6): 30-37.
- Xuan J W, Sheng J D. Analysis on the spatial-temporal variation of NDVI in the Manas River Watershed of Xinjiang from 2001 to 2017[J]. *Forest Resources Management*, 2018, 6(6): 30-37.
- [38] 黄犁, 徐雨萍. 玛纳斯河流域绿洲时空演变及其景观格局变化[J]. *干旱区研*, 2019, 36(5): 1261-1269.
- Huang L, Xu L P. An analysis of spatial and temporal evolution of oasis in the middle and lower reaches of Manas River Basin[J]. *Arid Zone Research*, 2019, 36(5): 1261-1269.
- [39] 李义玲, 乔木, 杨小林, 等. 干旱区典型流域近 30 年土地利用/土地覆被变化的分形特征分析: 以玛纳斯河流域为例[J]. *干旱区地理*, 2008(1): 75-81.
- Li Y L, Qiao M, Yang X L, et al. Analysis of fractal characteristics of land use/land cover change in typical watersheds in arid areas in recent 30 years: taking the Manas River Basin as an example[J]. *Arid Land Geography*, 2008(1): 75-81.
- [40] Meentemeyer R K, Condeso T E. Effects of landscape heterogeneity on the emerging forest disease sudden oak death[J]. *Phytopathology*, 2006, 96(6): 364-375.
- [41] Ito S, Nakayama R, Buckley G P. Effects of previous land-use on plant species diversity in semi-natural and plantation forests in a warm-temperate region in southeastern Kyushu, Japan[J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196(2-3): 213-225.
- [42] Damascena J G, Leite G L D, Silva F W S, et al. Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance[J]. *Ecography*, 2013, 36(1): 27-46.
- [43] Shannon C. A mathematical theory of communication[J]. *Bell System Technical Journal*, 1948, 27: 379-656.
- [44] Simpson E H. Measurement of diversity[J]. *Nature*, 1949, 163: 688.
- [45] 张文俊, 马珂, 师庆东, 等. 克拉玛依人工杨树碳汇林对土壤有机碳储量的影响[J]. *新疆农业科学*, 2012, 49(5): 856-861.
- Zhang W J, Ma K, Shi Q D, et al. The study of the influence poplar plantation carbon sink[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2012, 49(5): 856-861.
- [46] 张毓涛, 郭树芳, 张新平, 等. 克拉玛依人工林生物量与土壤理化性质[J]. *干旱区研究*, 2015, 32(2): 402-409.
- Zhang Y T, Guo S F, Zhang X P, et al. Biomass and soil physical and chemical properties[J]. *Arid Zone Research*, 2015, 32(2): 402-409.
- [47] 阿依古丽·买买提, 吉力力·阿不都外力, 葛拥晓. 玛纳斯河流域绿洲土壤养分空间变异特征与格局[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(9): 153-159.
- Mamat A, Abuduwai J, Ge Y X. Spatial variability and pattern of soil nutrients in the oasis of Manas River Watershed[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, 27(9): 153-159.
- [48] 张丽, 才日玛, 盛建东. 玛纳斯县农田土壤养分变化分析[J]. *新疆师范大学学报(自然科学版)*, 2014, 33(1): 20-26.
- Zhang L, Cai R M, Sheng J D. Analysis of soil nutrient changes in farmland in Manas County[J]. *Journal of Xinjiang Normal University (Natural Science Edition)*, 2014, 33(1): 20-26.
- [49] 沈浩, 吉力力·阿不都外力. 玛纳斯河流域农田土壤水盐空间分布特征及影响因素[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(3): 769-776.
- Shen H, Jili A W. Spatial distribution of soil moisture and salinity and their influence factors in the farmland of Manas River catchment, Northwest China[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(3): 769-776.
- [50] Schmiedel I, Bergmeier E, Culmsee H. Plant species richness patterns along a gradient of landscape modification intensity in Lower Saxony, Germany[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 141: 41-51.
- [51] Schulz C, Koch R, Cierjacks A, et al. Land change and loss of landscape diversity at the Caatinga phytogeographical domain: Analysis of pattern-process relationships with MODIS land cover products (2001-2012)[J]. *Journal of Arid Environments*, 2017, 136: 54-74.
- [52] Burnham K P, Anderson D R, Huyvaert K P. AIC model selection and multimodel inference in behavioral ecology: some background, observations, and comparisons[J]. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 2011, 65(1): 23-35.
- [53] Nakagawa S, Freckleton R P. Model averaging, missing data and multiple imputation: a case study for behavioural ecology[J]. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 2011, 65(1): 103-116.
- [54] Bates D, Mächler M, Bolker B S, et al. Fitting linear mixed-

- effects models using lme4[Z/OL]. *Journal of Statistical Software*, 2015 [2019-05-30]. <https://www.jstatsoft.org/issue/view/v067>.
- [55] Barton K. MuMIn: Multi-Model inference[J]. *R Package Version*, 2014, 1(10): 5-25.
- [56] Fatehi P, Damm A, Leiterer R, et al. Tree density and forest productivity in a heterogeneous alpine environment: insights from airborne laser scanning and imaging spectroscopy[J]. *Forests*, 2017, 8(6): 212.
- [57] Fatehi P, Damm A, Schaepman M, et al. Estimation of alpine forest structural variables from imaging spectrometer data[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(12): 16315-16338.
- [58] Shibata S. Effect of density control on tree growth at ecological tree planting sites in Japan[J]. *Landscape and Ecological Engineering*, 2006, 2(1): 13-19.
- [59] Gurr G M, Wratten S D, Landis D A, et al. Habitat management to suppress pest populations: progress and prospects[J]. *Annual Review of Entomology*, 2017, 62: 91-109.
- [60] Bolliger J, Schweizer W. Swiss forests and climate change: comparison of simulated quantitative vegetation models[J]. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 2002, 153(5): 167-175.
- [61] Van Drunen S G, McCune J L, Husband B C. Distribution and environmental correlates of fungal infection and host tree health in the endangered American chestnut in Canada[J]. *Forest Ecology and Management*, 2018, 427: 60-69.
- [62] Jactel H, Brockerhoff E G. Tree diversity reduces herbivory by forest insects[J]. *Ecology Letters*, 2007, 10(9): 835-848.
- [63] Guyot V, Castagneyrol B, Vialatte A, et al. Tree diversity limits the impact of an invasive forest pest[J]. *PLoS One*, 2015, 10(9), e0136469 [2019-11-05]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0136469>.
- [64] Jonsson, M, Straub C S, Didham R K, et al. Experimental evidence that the effectiveness of conservation biological control depends on landscape complexity[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2015, 52(5): 1274-1282.
- [65] Vasseur C, Joannon A, Aviron S, et al. The cropping systems mosaic: how does the hidden heterogeneity of agricultural landscapes drive arthropod populations[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 166: 3-14.
- [66] Tschamtké T, Bommarco R, Clough Y, et al. Reprint of "Conservation biological control and enemy diversity on a landscape scale"[J]. *Biological Control*, 2008, 45(2): 238-253.
- [67] Bianchi F J, Booij C J H, Tschamtké T. Sustainable pest regulation in agricultural landscapes: a review on landscape composition, biodiversity and natural pest control[J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2006, 273: 1715-1727.
- [68] Tillman P G, Smith H, Holland J. Cover crops and related methods for enhancing agricultural diversity and conservation biocontrol: Successful case studies[J/OL]. *Book Chapter*, 2012, 309-327 [2019-10-30]. <https://www.ars.usda.gov/research/publications/publication/?seqNo115=263004>.
- [69] 陈接华, 王绍明, 曹国栋, 等. 玛纳斯河流域不同地貌和植被类型下土壤物理性质研究[J]. *新疆农业科学*, 2012, 49(2): 354-361.
- Chen J H, Wang S M, Cao G D, et al. Study on soil physical properties under different landforms and vegetation types in manas river watershed[J]. *Xinjiang Agricultural Science*, 2012, 49(2): 354-361.
- [70] Dai L, Zhao W, Shao G, et al. The progress and challenges in sustainable forestry development in China[J]. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2013, 20(5): 394-403.
- [71] Ryan M G, Binkley D, Fownes J H. Age-related decline in forest productivity: pattern and process[J]. *Advances in Ecological Research*, 1997, 27: 213-262.
- [72] Castagneyrol B, Jactel H, Vacher C, et al. Effects of plant phylogenetic diversity on herbivory depend on herbivore specialization[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2014, 51(1): 134-141.
- [73] Iverson A L, Marin L E, Ennis K K, et al. Do polycultures promote win-wins or trade-offs in agricultural ecosystem services? A meta-analysis[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2014, 51(6): 1593-1602.
- [74] Castagneyrol B, Jactel H. Unraveling plant-animal diversity relationships: a meta-regression analysis[J]. *Ecology*, 2012, 93(9): 2115-2124.
- [75] Guyot V, Castagneyrol B, Vialatte A, et al. Tree diversity reduces pest damage in mature forests across Europe[J]. *Biology Letters*, 2016, 12(4): 20151037.
- [76] Rega C, Bartual A M, Bocci G, et al. A pan-European model of landscape potential to support natural pest control services[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 90: 653-664.
- [77] Brockerhoff E G, Kimberley M, Liebhold A M, et al. Predicting how altering propagule pressure changes establishment rates of biological invaders across species pools[J]. *Ecology*, 2014, 95(3): 594-601.
- [78] Haack R A, Britton K O, Brockerhoff E G, et al. Effectiveness of the International Phytosanitary Standard ISPM No. 15 on reducing wood borer infestation rates in wood packaging material entering the United States[J/OL]. *PLoS One*, 2014, 9(5), e96611 [2019-05-30]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0096611>.
- [79] Roy B A, Alexander, H M, Davidson J, et al. Increasing forest loss worldwide from invasive pests requires new trade regulations[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2014, 12(8): 457-465.

(责任编辑 范娟 崔艳红
责任编辑委 赵秀海)