

DOI: 10.5846/stxb201912182730

倪广艳.外来树种的耗水特征及其对环境水资源的影响.生态学报, 2021, 41(3): 934-942.

Ni G Y. Water use strategies of alien trees and their impacts on water resource. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(3): 934-942.

外来树种的耗水特征及其对环境水资源的影响

倪广艳^{1,2,*}

1 中国科学院华南植物园, 广州 510650

2 中国科学院退化生态系统植被恢复与管理重点实验室, 广州 510650

摘要:外来树种常被作为“先锋树种”广泛引种,在荒山造林和水土保持方面发挥了积极作用;然而,不少外来树种具有高耗水和强抗旱的水分利用特性,耗水量大、水分消耗快,若不加甄别地引种会影响甚至危害本土森林生态系统的健康。目前,部分被引种的外来树种已造成入侵;同时,在当前水资源缺乏的形势下,外来树种的引种安全问题已成为全球关注的生态环境问题。本文综述了外来树种在生态系统、整树、叶片及枝条水平的耗水特性,分析了外来树种对引种地水资源的影响。前期的研究结果显示,被引种的外来树种在生态系统及整树水平的耗水量普遍高于乡土树种,但对水资源的影响却因受控于多个因素如环境、气候、植物个体等而不尽相同;同时还显示,外来树种在叶片和枝条水平的耗水特性更多地体现了其应对环境变化的水分利用策略。研究还就提高外来树种耗水特性研究的准确性和提升外来树种危害风险的预警能力方面,提出了若干研究方向,旨在为森林管理者和政府部门平衡外来树种的经济效益和生态效应提供借鉴和指导,以期降低外来树种引种风险,增进生态安全。
关键词:外来树种;水分利用特征;水资源;入侵性

Water use strategies of alien trees and their impacts on water resource

NI Guangyan^{1,2,*}

1 South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China

2 Key Laboratory of Vegetation and Management of Degraded Ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China

Abstract: Alien tree species play significant roles in forestation and conservation of soil and water. Due to their fast growth-induced high water consumption and drought resistance characteristics, many alien tree species have affected and even damaged native forest ecosystems, and some species have been reported to be the noxious invasive species. These alien tree species have caused significantly environmental problems. Regarding water consumption of alien tree species, we reviewed their water use strategies in scales of ecosystem, whole tree, leaf and branch. We also analyzed their impacts on underground water quality and nutrient cycling, and water resource of local forest ecosystem. The results demonstrate that the alien tree species usually consume more water than local native species at whole-tree and ecosystem levels, and the hydraulic adjustment of alien trees to different soil water availability are presented mostly at leaf and branch level. However, it is not necessarily to prove that they have the negative impacts on local water resources as such impacts are closely associated with many factors including environment, climate and tree individual characters. At last, in order to improve the water use research and risk assessment of alien tree species, we proposed several research concerns in the near future. Firstly, precisely evaluating the effects of alien trees on water resource largely depends on the well-recognition of their water use regulation, therefore both the evaluation and regulation studies should be strengthened. Moreover, applying key water use characteristics in risk assessment systems and in alien tree species database construction could be considered as efficient

基金项目:国家自然科学基金项目(31971498, 31770646);广东省科技计划项目(2019B121202001);广州市科技计划项目(201707010226)

收稿日期:2019-12-18; **网络出版日期:**2020-12-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guangyan.ni@scbg.ac.cn

and important pathways not only for invasion plants control, but also in forestation water management. This review is applicable for forest managers and government to balance the economic and ecological outcomes of alien trees, and to improve ecological safety.

Key Words: alien tree species; water use strategy; water resource; invasiveness

有些外来树种具有良好的环境适应性,它们在荒山造林和水土保持方面发挥了重要作用,也在生态、经济和社会生活方面发挥着积极作用。不少外来树种由于易生长、经济价值高等优点,其引种普遍受世界各国的重视。随着对植物资源研究的不断深入,开发力度增大,外来树种引种也在全球范围内愈演愈烈,以至于部分被引种的外来树种已对林业健康、生态系统服务功能造成了严重破坏,成为名副其实的入侵树种。近年来,关于外来树种对本地森林生态系统产生负面影响的报道增加,同时关于引种树木具有入侵潜力或已成为入侵树种的报道也不断出现^[1-3],如北美的乌桕(*Sapium sebiferum*)、怪柳及相关树种(*Tamarix ramosissima*, *Tamarix spp.*)^[4],在南非地区也有二十多种外来树种被作为入侵种报道^[5]。入侵专业杂志《Biological Invasions》在2014年以专刊形式报道了全球外来树种的入侵情况,并指出这是人类即将面临的环境问题和挑战^[6]。目前,我国的森林资源也面临着巨大的生态环境和经济压力,虽然关于我国的外来树种、具有潜在危害的外来树种,以及已经被认定为入侵树种的外来树种的数目均未见权威统计,但是诸如北方的火炬树(*Rhus Typhina*)、巴西胡椒木(*Schinus terebinthifolius*)、杨树(*Populus spp.*),南方的桉树(*Eucalyptus spp.*)等,尽管这些树种的入侵性和危害性尚存在争议,但不可否认它们已对部分生态系统产生了严重影响^[7-8]。本文将不再赘述外来树种对生态和社会的积极效应,而重点关注其引种风险,为积极防控以及效益最大化提供理论支撑。

植物通过蒸腾作用将根系从土壤吸收的水分输送到各个器官,以满足体内各种生命代谢活动的需求,最终以水汽形式从叶片、枝条或树干逸散到体外。蒸腾过程形成的水分传输是生态系统物质循环和能量流动的主要驱动力。由于引种时的人为选择,引种的外来树种生长速度往往较本地树种快,耗水量也相对比本地树种高^[9-10],因此它们的引入会影响区域内其他生态过程如碳、氮循环等的水分供给,进而影响整个生态系统的功能^[11];然而,也有学者认为,尽管外来树种用水量大,但若经营得当,会增加森林群落的生物多样性、提高群落用水效率等,有利于本地生态系统的健康^[12]。因此,评价被引种的外来树种对原有生态系统水循环的影响,预测其可能的生态危害,不仅需要深入研究其个体的用水特征,还要综合研究其所处群落的水循环特征。面对当前外来树种引种力度加大,引种树种增多、种植面积增加而水资源普遍亏缺的形势,了解外来树种的耗水特征,正确合理地评价外来树种的引入对本地生态系统水循环的影响,有助于指导森林生态系统的可持续利用,实现林业的可持续发展,有重要意义。

1 外来树种的水分利用特征

外来树种之所以被世界各国重视并广泛引种,与其自身的生长优势密不可分。与乡土树种相比,被成功引种的外来树种往往具有较高的相对增长率^[13],还具有更强的环境适应能力^[14]。已有研究指出,不少外来树种比乡土树种具有生长优势的重要生理基础是其耗水量更高^[9-10, 15-17],并因此影响森林生态系统内其他生态过程(如碳、氮循环等)的水分供应,最终影响整个生态系统的功能^[11]。外来树种极强的环境适应能力使其能够在诸多不利条件下顽强地生长,较突出地体现为以抗孔穴化为主的强抗旱能力^[18-19]、高效的水分传输^[20]和利用能力^[21],这些生理特性除了需要树木调整自身水力结构,如导管直径、纹孔膜大小以及导管间的水力连接度等,还需要以消耗大量的土壤水分及营养资源为基础^[9-10, 15-16]。外来树种的这些生理特性均与水分利用息息相关,并影响植物器官、个体、群落乃至集水区的水量平衡和水循环。

1.1 生态系统尺度

研究者在研究外来树种对生态系统水资源的影响时常以集水区为研究对象,围绕被引入的外来树种对集

水区内地表径流和地下水补充的影响等开展研究,如分析外来树种人工林和对照林(乡土树种)内地表径流的差异,以及外来树种种植前后地表径流和留存水的动态变化等^[5,22-23]。由于南非地区水资源缺乏问题尤为突出,一些学者较早地在该区域开展了外来树种引种对水资源影响的系统性研究,发现在南非德拉肯斯堡地区种植松树 20 年后,地表径流量降低了 82%^[24];在西开普地区种植松树 23 年后,地表径流量下降了 55%^[25];在姆普马兰加省的松树和桉树完全取代草地 6—12 年后,该地区地表径流因土地利用模式的改变而完全干枯^[26];红客沙谷的外来树种比乡土植物水分蒸发量更大、蒸发速率更快,导致地表径流量更低^[27]。在生态系统水平上,外来树种的耗水量大,大面积人工种植在改变植被类型的同时也会给本地生态系统带来水分损失^[28]。在欧洲、北美等地也已有不少关于外来树种水分利用的研究;然而,这些研究更多是从群落、个体或小尺度水分利用特征方面开展的,从生态系统角度开展的研究并不多见^[9]。

生态系统尺度的水分利用研究往往涉及到模型的运用,而模型的假设、参数的选择及数据处理的方法等均会影响模型模拟的结果。随着模型参数的不断细化和调整,近年来有关南非外来树种入侵对森林年地表径流影响的研究结果与 1998 年普查的结果差异较大^[29]。利用彭曼公式模型可以较准确地估测入侵南非的松树(*Pinus pinaster* & *P. halepensis*)的林分蒸腾量,而利用地表能量平衡法估测的森林蒸散量的结果,往往会因受森林土壤环境异质性的影响而不准确^[30]。尽管生态系统水平上水分利用研究结果的准确性存在一定不足,但研究结果在一定程度上仍可以为从大尺度评价外来树种水资源消耗、水文效应乃至其他生态效应提供理论和数据支撑。

1.2 树木整树水平

树木整树耗水特性是选择造林树种与合理配置林分的重要参考,因此外来树种的水分传输能力、规律特别是耗水特性已受到国内外树木水分生理学家、生态学家的普遍关注。与乡土树种相比,外来树种通常更高大、生长更快、根际更深,使其在增加森林生态系统地上部分生物量的同时,也提高了土壤水分蒸发、蒸腾损失量^[15],降低地表径流量以及地下水的补充量^[31]。

利用树干液流技术测定整树蒸腾是目前研究整树水分利用的最常用方法之一,该方法能较真实地反映整树在不同时间(时、日、季节、年等)尺度上的蒸腾耗水格局和耗水量,同时该方法还具有操作简单、测量精度高的优点^[32],因此,许多国内外学者利用该技术来研究外来树种的水分利用。Cavaleri 等^[10]采用去除入侵种并结合热消散探针研究了夏威夷群岛入侵树种(*Cecropia obtusifolia*, *Macaranga mappa*, *Melastoma septemnerium*)和乡土树种(*Metrosideros polymorpha*)的用水特征,发现去除入侵树种样地在林分水平的用水量仅为入侵树种样地的一半;去除入侵树种后,伴生乡土树种呈现出明显的补偿性水分利用特征。夏威夷群岛外来树种柳叶桉(*Eucalyptus saligna*)和墨西哥光蜡树(*Fraxinus uhdei*)的液流密度和整树水分利用量均高于乡土树种多型铁心木(*Metrosideros polymorpha*),它们立地水平的水分利用量比多型铁心木的高 3—9 倍,同时墨西哥光蜡树的日用水量是多型铁心木的 2 倍^[9]。

基于气孔 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 交换的耦合和 CO_2 同位素分馏原理测定植物(木质部、叶片等) $\delta^{13}\text{C}$ 可以反映植物的水分利用效率^[33],因此稳定性同位素分析技术也是研究植物水分利用的一个重要方法。这一方法多被用于研究植物及植物功能群在较长时间尺度上与环境变化及气候变迁等的关系^[34-35],不少学者也尝试用该方法研究外来树种的水分利用。如 Wang 等^[36]利用稳定同位素结合冠层 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 耦合交换的原理测定华南丘陵地区马占相思人工林的林分冠层蒸腾,并以此估算该人工林冠层吸收 CO_2 通量,发现马占相思冠层 CO_2 吸收的日变化与冠层气孔导度变化密切相关,其季节变化受冠层气孔导度对水汽压亏缺、光合有效辐射及土壤水分亏缺敏感度的影响。Stratton 和 Goldstein^[14]比较夏威夷 Lana'i 岛入侵树种巴西胡椒木(*Schinus terebinthifolius*)和 7 种乡土优势树种叶片 $\delta^{13}\text{C}$,发现前者具有更强的表型可塑性,如湿季茎秆生长快、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 吸收和交换快,干季叶片水势高、水分损失率低,以保证水分的有效利用。外来树种樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)和小钻杨(*Populus* × *xiaozhuanica*)、乡土树种油松(*Pinus tabulaeformis*)和榆树(*Ulmus pumila*)的年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 均随温度升高而增加,且外来树种的增加幅度更大,显示其经受了更大的水分压力^[37]。

由于利用稳定同位素测算水分利用效率的方法比传统的利用物质生成与水分消耗关系计算的方法更加便捷,也比利用蒸腾与光合的关系计算得到的瞬时水分利用效率更加可靠,因此测定植物不同部位的稳定同位素不仅可以为探索全球变化提供可靠的证据,也可用作植物选育的一个重要指标,可以从水分利用效率角度选育出符合引种需求的外来树种。值得注意的是,稳定同位素具有除了种间差异^[38],还具有种内差异,与其生长参数如生物量、高度等呈明显正相关,该相关关系的强弱还随水分条件及树龄的变化而变化^[39],因此利用稳定同位素研究植物水分利用效率需综合考虑植物生长环境的水分条件以及个体特征等。

1.3 枝条和叶片水平

Zeballos 等^[40]通过比较阿根廷中部地区森林中 8 种外来树种和 12 种乡土树种的叶片特征,发现前者的最小叶片水势(Ψ_{\min})更高、木材密度(wood density)更低,致使木质部水分传输效率更高;同时,外来树种的比叶面积(specific leaf area, SLA)更高,说明其获取资源的能力更强。Pratt 和 Black^[41]通过研究美国 5 个州的 5 对外来和乡土树种的木质部水分特性,发现它们木质部水力导度(K_s)及 75% 水力传导率丧失时叶片水势(Ψ_{75})的差异不显著,认为外来树种的叶片水力特性并无优势。Cavaleri 和 Sack^[28]应用 meta 分析比较了 37 对入侵和乡土植物的最小叶片水势(Ψ_{\min})及 30 对入侵和乡土植物的正午叶片水势(Ψ_{md}),发现入侵植物的 Ψ_{\min} 比乡土植物的低 73%,而二者 Ψ_{md} 的差异不明显,表明外来植物需要克服更大的叶片/土壤水势梯度以获取土壤水分;但是,该研究的对象主要是草本植物,结果又与 Zeballos 等^[40]报导的外来树种的结果相反,因此上述结论是否适用木本植物仍有待于进一步验证。综上,这些研究所涉及的水力特征实际上反映的是植物在叶片和枝条水平上调节和缓解水柱张力的能力,而植物的水力调节能力不仅与叶片和枝条的水力结构有关,还与树木储存水、树形特征(如树高、胸径、边材面积、冠幅等)及树龄等密切相关^[42-43]。

水汽交换是植物水分利用的重要生理参数之一。早期,常基于测定盆栽实验(幼苗)的气孔水汽交换来研究外来树种的水分利用。例如,廖观荣等^[44]研究发现土壤含水量越高,幼龄桉树(刚果 W5)蒸腾量越大;赵平等^[45]发现马占相思在低水汽压亏缺下冠层平均气孔导度高于乡土树种桃金娘、九节及荷木,更加耐旱,适用于华南丘陵地区的植被恢复。段爱国等^[46]通过研究金沙江干热河谷 29 个造林树种盆植苗在干旱胁迫下的蒸腾耗水特性,将它们的蒸腾耗水率分为高、亚高、亚低和低 4 类,用以指导造林和林分改造。

叶片和枝条水平的研究结果在很大程度上反映了植物局部水分利用特征,也从生理学角度阐释了植物适应不同水分条件的策略:植物通过调节叶片、枝条的水力结构以适应不同的水分条件,调节能力的大小反映了它们获取和利用水资源能力的强弱^[47-48]。赵平^[49]报道了外来树种马占相思林冠层蒸腾对水汽压亏缺的响应模式呈现出明显的两个阶段,即当水汽压亏缺(vapor pressure deficit, VPD) < 0.85 kPa 时,冠层蒸腾主要受气孔导度控制;而当 VPD > 0.85 kPa 时,则受水力导度和气孔导度协同控制。已在南非地区造成入侵的灰杨(*Populus canescens*)的水力阻力(hydraulic resistance)变化范围为 1.4 MPa h/g(大树)—14.3 MPa h/g(小树),显著高于温带地区的大多数树种;这种高水力阻力不仅可以保证木质部的连续输水,还可以有效地避免树木直接受水汽压亏缺控制而过度失水^[50]。欧洲的外来树种臭椿(*Ailanthus altissima*)和乡土植物花栲(*Fraxinus ornus*)在面对干旱和高温时的用水策略不同,花栲的耐旱性更强,而臭椿不耐旱但水分传输更快,而且可以修复过度干旱引起的水力伤害,后者总体表现出更强的表型可塑性^[20]。综上结果显示,外来树种可以通过调节整树水力结构以避免木质部的空穴化,实现水分的持续传输和有效利用,但外来树种的水力结构的调节能力是否高于乡土树种,目前还不清楚。

综上,无论是生态系统、整树还是枝条叶片水平的研究在反应不同空间层次的问题上各有优点,只是在尺度扩展时由于缺少合理有效的尺度转换因子,目前还难以实现从枝条水平向整树、乃至生态系统水平的尺度扩展。

2 外来树种对水资源的影响

2.1 影响水质与元素循环

外来树种通常能分泌多种化感物质,如酚酸和挥发油等,这些化感物质不仅可以作为生物抑制剂来改变

土壤元素循环,还可以通过土壤侵蚀和地表径流等途径来影响地表水的水质^[24]。例如,入侵南非的伞树(*Acacia saligna*)分泌的酚酸使土壤内多种元素的浓度增加近 2 倍,直接改变乡土植物的生长环境^[51];伞树凋落物的数量明显高于本地植物,凋落物中 N 的含量是本地植物的 3 倍,其凋落物进入土壤后也会改变土壤元素组成,因此伞树覆盖区内土壤 N 含量显著高于非覆盖区^[52]。南非高山硬叶灌木林内有多种入侵植物会分泌化学物质(如多酚类),这些化学物质被降解成腐殖质及其他有机物后进入水体,导致水体颜色变暗,pH 和 P 含量降低^[24,53]。外来树种入侵还会加剧入侵地土壤水分的蒸发蒸腾,导致土壤盐碱度升高。如美国科罗拉多州被柽柳(*Tamarix spp.*)入侵区域内地下水的盐度是周边未被入侵区域的 4 倍^[54];外来豆科植物黑荆(*Acacia mearnsii*)叶片的 N 含量高于非固氮乡土植物的,较高的土壤可利用水分更有助于提高叶片的 N 含量,并改变群落中其他树种的 N 含量及动态^[55];外来树种臭椿(*Ailanthus altissima*)则会降低土壤 N 含量^[56]。目前,虽然从理论上理解了外来树种入侵会改变地下水水质,但对于外来树种入侵引起的土壤化学组成和含量的变化,乃至地下水化学和水质变化的认识仍非常有限,而且由于缺乏生态系统水平的研究,外来树种入侵对区域内的元素循环影响也不清楚。

2.2 对水资源环境的影响

在生态系统和整树水平的研究结果显示,外来树种的耗水量通常比本地树种高,在降雨量少、水资源宝贵的南非^[5]、印度中部^[57]等地区引种外来树种已造成了大量水分损失。在我国西南地区种植的巨尾桉(*Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla*)的水分利用效率高、生物量大,虽然还未引起过多的水分消耗,但其林下径流系数较本地自然林的高,不利于林内水分保存^[58]。然而,并非所有外来树种都会消耗更多土壤水分,并对引种地生态系统产生负面影响。如我国雷州半岛尾叶桉(*Eucalyptus urophylla*)人工林的用水量未超过林区内的年降雨量,不影响当地的水分供应^[59];广东省内人工林的潜在蒸散量低于林区降雨量,因此大规模造林不会使当地水资源供应量下降^[60]。利用 Meta 分析全球尺度人工造林(以外来树种为主)对区域水循环的影响时发现,在天然径流量小于年降雨量 10% 的地区,人工造林可导致河流断流;而在天然径流达到年降雨量 30% 的区域,造林可使径流量减少一半甚至更多^[61]。因此,虽然不少外来树种的耗水量大,但笼统地认为它们会消耗更多的土壤水分并不确切,还需要考虑集水区内的降雨量、蒸散量与径流量等决定区域内水量平衡的环境因素。外来树种所处的气候带也与其对林区水资源的影响有关,如温暖湿润地区的入侵植物与本地植物之间的用水差异比干旱寒冷地区的差异大^[9]。

森林水资源除了受集水区层次影响外,还受树种个体特征(立木密度、树木大小、年龄、边材分布、根系分布、根系生长速率、个体生长速率等)、群落特征(冠层、物种组成、林下植被多样性、土壤水分状况及小气候环境等)等的共同影响。通过研究埃塞俄比亚南部地区两种入侵树种墨西哥柏木(*Cupressus lusitanica*)、蓝桉(*Eucalyptus globulus*)和乡土树种镰叶罗汉松(*Podocarpus falcatus*)的土壤-植物水分动态时发现,墨西哥柏木的冠层密闭、根系分布浅,其生长的土壤最干燥,这在降雨量低的时候尤其明显,说明外来树种的耗水的量与其根系、冠层等密切相关^[62]。14—15 年龄的蓝桉(*Eucalyptus globulus*)和黑荆(*Acacia mearnsii*)混合林的冠层光合能力、地上与地下生物量比例均比它们各自纯林的高,致使混合林的水分利用率更高^[21]。几种造林树种(*Betula papyrifera*, *Populus tremuloides*, *Pinus banksiana*, *Picea mariana*)的冠层蒸腾(E_c)与群落内植物的细根量呈显著正相关,但与叶面积指数、胸高断面积及边材面积等的相关性不明显^[63]。在津巴布韦东北部地区原为牧场的草场内种植赤桉(*Eucalyptus camaldulensis*)以后,其林下草本植物的种数、高度和组成接近于天然草场的^[64]。

综上所述,正确、合理地评价外来树种对其林区水资源环境的影响需要结合区域内降雨量、降雨分布、造林前后地表径流、群落特征及树种个体特性等诸多环境与生物因素。以外来树种进行造林工程,在考虑经济利益的同时,还需兼顾生态效益与环境安全,这在当前水资源时空分布差异大、社会和经济活动对水资源需求量增加的背景下尤为重要。

3 展望

外来速生树种不仅可以为社会提供木材和纤维,防控森林水土流失,为社区和公园提供美学享受和舒适的环境,还可以给政府和人民带来了巨大的经济效益;但是,由于外来树种自身生长的特征,一旦失控也会对生态系统产生负面效应,因此部分外来树种的引种被认为是一种威胁水资源安全的利用方式^[65]。如何平衡经济效益与生态效益之间的矛盾,最大程度地发挥外来树种的作用,是政府部门和林业经营者不容忽视的问题,而该问题的解决很大程度上取决于对外来树种本身及其对本土生态系统所产生影响的认识。基于以上研究现状,结合外来树种可能的发展趋势,我们从合理利用外来树种,防控危害蔓延的角度提出以下几点研究方向。

3.1 综合认识耗水特性,合理评价水资源效应

正确认识外来树种的耗水特性是合理评价外来树种对水资源影响的重要前提。受研究手段和方法的限制,无论是在叶片和枝条、植物个体水平,还是从个体向群落、群落向生态系统扩展,每个环节均受环境因素的影响,加之尺度推绎本身的误差,最终都会引起研究结果的偏差。因此,未来研究中需要学者综合利用多种技术手段,厘清外来树种耗水受集水区及群落环境因素等的影响,解析外来树种的水分利用及其随环境的变化;同时,结合被入侵生态系统内水分平衡状态的空间异质性,正确评价外来树种人工林的正面和负面效应,平衡其经济与生态效应。

3.2 提取水分利用要素,构建引种风险预警体系

外来树种的生物学特征和功能性状是评估其入侵风险的重要依据^[66-68]。外来树种对水分的获取量和利用方式优势是其快速生长的基础,也是决定它们对引种地生态系统产生负面影响的内在因素。当前,以生长、繁殖和扩散能力为基础的入侵评价系统更适合草本植物,而树木则更多地依赖于相对增长率。以相对增长率为基础的评价体系虽然可以很好识别水分需求大的外来树种^[13,69],但是存在测定取样难的缺陷,而且测定时间受季节、年份等多种因素的影响。外来树种是否具有水分利用的水力优势,以及由此产生入侵性的内在机理仍不清楚^[28]。能否将水力优势和水分利用特征纳入以相对生长率为基础的适用于入侵树种的评价系统,识别凭自身高耗水或高抗逆性而形成生长优势的物种,提高风险控制能力,是值得深入探讨的机理和应用问题。

3.3 考量水分利用特性,构建引种安全数据库

数据库建设与维护是世界范围内外来树种研究的主要内容之一,也是对被入侵生态系统进行有效管理的重要依据之一。国际上,现有重要的相关数据库包括“全球入侵数据库^[70]”,“美国农业部国家外来入侵物种信息中心^[71]”,“国际应用生物科学中心(CABI)入侵物种大百科^[72]”。在我国的相关数据库有“中国外来入侵物种数据库^[73]”,以及一些名录类网站;但是,现有数据库主要针对已造成入侵的物种,而不能识别具有潜在危害的外来物种。同时,这些已有数据库的主体对象是草本植物和昆虫,很少涉及木本的外来树种。外来树种的生活史长,危害的潜伏期长,它们的危害虽然不像草本植物那么直观和迅速,但是一旦形成危害,生态后果更为严重。因此,有针对性地建立外来树种危害性的数据库,识别潜在入侵树种,势在必行。可行的方法包括但不限于在已有的入侵物种数据库的基础上,添加外来树种模块,增加有益于识别其潜在危害的数据;也可以参考现有的入侵数据库,针对已引种的外来树种,建立专门数据库。

在数据库建立过程中,除了综合现有数据库的相关数据,还需要考量以下两点。其一,有关参数的选择,可以考虑增加水分利用效率、水力结构、用水量等水分利用关键参数,并分不同年龄段、胸径、适宜种植范围等进行归类,以便指导林业种植,保证用水安全。其二,多部门合作,国家林业和草原局拥有较详细的世界及我国各省市造林树种特性的信息,但这些数据信息自成一体,后期需要在综合这些已有信息的基础上,建立针对外来树种种植的监控体系;政府林业部门管理着国家公园、林区林场等大范围的数据,科研院所则在实践和理论上对研究点或/和面有很好的积累,因此数据库可考虑由政府林业部门和科研院所共同管理和维护,各尽所

能,各取所需,实现数据共享和共同维护,多方努力,建立适合我国的外来树种安全引种数据库。

参考文献 (References):

- [1] Jackson R B, Banner J L, Jobbágy E G, Pockman W T, Wall D H. Ecosystem carbon loss with woody plant invasion of grasslands. *Nature*, 2002, 418(6898): 623-626.
- [2] Richardson D M, Rejmánek M. Trees and shrubs as invasive alien species-a global review. *Diversity and Distribution*, 2011, 17(5): 788-809.
- [3] Richardson D M, Hui C, Nuñez M A, Pauchard A. Tree invasions: patterns, processes, challenges and opportunities. *Biological Invasions*, 2014, 16(3): 473-481.
- [4] Glenn E P, Nagler P L. Comparative ecophysiology of *Tamarix ramosissima* and native trees in western U.S. riparian zones. *Journal of Arid Environments*, 2005, 61(3): 419-446.
- [5] Le Maitre D C, Gush M B, Dzikiti S. Impacts of invading alien plant species on water flows at stand and catchment scales. *AoB Plants*, 2015, 7: plv043.
- [6] Rejmánek M. Invasive trees and shrubs: where do they come from and what we should expect in the future? *Biological Invasions*, 2014, 16(3): 483-498.
- [7] 郑勇奇, 张川红. 外来树种生物入侵研究现状与进展. *林业科学*, 2006, 42(11): 114-122.
- [8] 郑景明, 李俊清, 孙启祥, 周金星. 外来木本植物入侵的生态预测与风险评估综述. *生态学报*, 2008, 28(11): 5549-5560.
- [9] Kagawa A, Sack L, Duarte K, James S. Hawaiian native forest conserves water relative to timber plantation: species and stand traits influence water use. *Ecological Application*, 2009, 19(6): 1429-1443.
- [10] Cavaleri M A, Ostertag R, Cordell S, Sack L. Native trees show conservative water use relative to invasive trees: results from a removal experiment in a Hawaiian wet forest. *Conservation Physiology*, 2014, 2(1): cou016.
- [11] Ehrenfeld J G. Ecosystem consequences of biological invasions. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2010, 41: 59-80.
- [12] 平亮, 谢宗强. 引种桉树对本地生物多样性的影响. *应用生态学报*, 2009, 20(7): 1765-1774.
- [13] Grotkopp E, Erskine-Ogden E, Rejmánek M. Assessing potential invasiveness of woody horticultural plant species using seedling growth rate traits. *Journal of Applied Ecology*, 2010, 47(6): 1320-1328.
- [14] Stratton L C, Goldstein G. Carbon uptake, growth and resource-use efficiency in one invasive and six native Hawaiian dry forest tree species. *Tree Physiology*, 2001, 21(18): 1327-1334.
- [15] Calder I, Dye P. Hydrological impacts of invasive alien plants. *Land Use and Water Resources Research*, 2001, 1(7): 1-8.
- [16] Calder I R, Rosier P T W, Prasanna K T, Parameswarappa S. *Eucalyptus* water use greater than rainfall input-possible explanation from southern India. *Hydrology and Earth System Sciences*, 1997, 1(2): 249-256.
- [17] Rascher K G, Große-Stoltenberg A, Mágua C, Werner C. Understory invasion by *Acacia longifolia* alters the water balance and carbon gain of a Mediterranean pine forest. *Ecosystems*, 2011, 14(6): 904-919.
- [18] Yazaki K, Sano Y, Fujikawa S, Nakano T, Ishida A. Response to dehydration and irrigation in invasive and native saplings: osmotic adjustment versus leaf shedding. *Tree Physiology*, 2010, 30(5): 597-607.
- [19] Crous C J, Jacobs S M, Esler K J. Drought-tolerance of an invasive alien tree, *Acacia mearnsii* and two native competitors in fynbos riparian ecotones. *Biological Invasions*, 2012, 14(3): 619-631.
- [20] Petruzzellis F, Nardini A, Savi T, Tonet V, Castello M, Bacaro G. Less safety for more efficiency: water relations and hydraulics of the invasive tree *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle compared with native *Fraxinus ornus* L. *Tree Physiology*, 2019, 39(1): 76-87.
- [21] Forrester D I, Theiveyanathan S, Collopy J J, Marcar N E. Enhanced water use efficiency in a mixed *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii* plantation. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(9): 1761-1770.
- [22] Gørgens A H M, van Wilgen B W. Invasive alien plants and water resources in South Africa: current understanding, predictive ability and research challenges. *South African Journal of Science*, 2004, 100(1/2): 27-33.
- [23] Brown A E, Zhang L, McMahon T A, Western A W, Vertessy R A. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology*, 2005, 310(1/4): 28-61.
- [24] Chamier J, Schachtschneider K, Le Maitre D C, Ashton P, van Wilgen B W. Impacts of invasive alien plants on water quality, with particular emphasis on South Africa. *Water SA*, 2012, 38(2): 345-356.
- [25] van Wyk D B. Some effects of afforestation on streamflow in the Western Cape Province, South Africa. *Water SA*, 1987, 13(1): 31-36.
- [26] van Lill W S, Kruger F J, van Wyk D B. The effect of afforestation with *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden and *Pinus patula* Schlecht. et Cham. on streamflow from experimental catchments at Mokobulaan, Transvaal. *Journal of Hydrology*, 1980, 48(1/2): 107-118.

- [27] Showers K B. Prehistory of Southern African forestry: from vegetable garden to tree plantation. *Environment and History*, 2010, 16(3): 295-322.
- [28] Cavaleri M A, Sack L. Comparative water use of native and invasive plants at multiple scales: a global meta-analysis. *Ecology*, 2010, 91(9): 2705-2715.
- [29] Le Maitre D C, Forsyth G G, Dzikiti S, Gush M B. Estimates of the impacts of invasive alien plants on water flows in South Africa. *Water SA*, 2016, 42(4): 659-672.
- [30] Dzikiti S, Schachtschneider K, Naiken V, Gush M, Le Maitre D. Comparison of water-use by alien invasive pine trees growing in riparian and non-riparian zones in the Western Cape Province, South Africa. *Forest Ecology and Management*, 2013, 293: 92-102.
- [31] Malan H L, Day J A. Linking Discharge, Water Quality and Biotic Response in Rivers: a Literature Review. Pretoria: Water Research Commission, 2002.
- [32] 孙慧珍, 周晓峰, 康绍忠. 应用热技术研究树干液流进展. *应用生态学报*, 2004, 15(6): 1074-1078.
- [33] Farquhar G D, O'leary M H, Berry J A. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1982, 9(2): 121-137.
- [34] Le Roux X, Bariac T, Sinoquet H, Genty B, Piel C, Mariotti A, Girardin G, Richard P. Spatial distribution of leaf water-use efficiency and carbon isotope discrimination within an isolated tree crown. *Plant, Cell & Environment*, 2001, 24(10): 1021-1032.
- [35] Rascher K G, Mágua C, Werner C. On the use of phloem sap $\delta^{13}\text{C}$ as an indicator of canopy carbon discrimination. *Tree Physiology*, 2010, 30(12): 1499-1514.
- [36] Wang H, Zhao P, Zou L L, McCarthy H R, Zeng X P, Ni G Y, Rao X Q. CO_2 uptake of a mature *Acacia mangium* plantation estimated from sap flow measurements and stable carbon isotope discrimination. *Biogeosciences*, 2014, 11(5): 1393-1411.
- [37] Song L N, Zhu J J, Zhang J X, Wang K, Lü L Y, Wang F B, Wang G C. Divergent growth responses to warming and drying climates between native and non-native tree species in Northeast China. *Trees*, 2019, 33(4): 1143-1155.
- [38] Cernusak L A, Aranda J, Marshall J D, Winter K. Large variation in whole-plant water-use efficiency among tropical tree species. *New Phytologist*, 2007, 173(2): 294-305.
- [39] Fardusi M J, Ferrio J P, Comas C, Voltas J, de Dios V R, Serrano L. Intra-specific association between carbon isotope composition and productivity in woody plants: a meta-analysis. *Plant Science*, 2016, 251: 110-118.
- [40] Zeballos S R, Giorgis M A, Cingolani A M, Cabido M, Whitworth-Hulse J I, Gurvich D E. Do alien and native tree species from Central Argentina differ in their water transport strategy? *Austral Ecology*, 2014, 39(8): 984-991.
- [41] Pratt R B, Black R A. Do invasive trees have a hydraulic advantage over native trees? *Biological Invasions*, 2006, 8(6): 1331-1341.
- [42] 张雷, 孙鹏森, 刘世荣. 树干液流对环境变化响应研究进展. *生态学报*, 2009, 29(10): 5600-5610.
- [43] 赵平, 孙谷畴, 倪广艳, 曾小平. 成熟马占相思水力导度对水分利用和光合响应的季节性差异. *应用生态学报*, 2013, 24(1): 49-56.
- [44] 廖观荣, 钟继洪, 郭庆荣, 李淑仪, 蓝佩玲. 土壤水分对幼龄桉树蒸腾和生长的影响. *土壤与环境*, 2001, 10(4): 285-288.
- [45] 赵平, 刘惠, 孙谷畴. 4种植物气孔对水汽压亏缺敏感度的种间差异. *中山大学学报: 自然科学版*, 2007, 46(4): 63-68.
- [46] 段爱国, 张建国, 何彩云, 张俊佩, 张守攻. 干旱胁迫下金沙江干热河谷主要造林树种盆植苗的蒸腾耗水特性. *林业科学研究*, 2008, 21(4): 436-445.
- [47] Cochard H, Bréda N, Granier A. Whole tree hydraulic conductance and water loss regulation in *Quercus* during drought: evidence for stomatal control of embolism? *Annales des Sciences Forestières*, 1996, 53(2/3): 197-206.
- [48] Lu P, Biron P, Granier A, Cochard H. Water relations of adult Norway spruce (*Picea abies* (L) Karst) under soil drought in the Vosges mountains: whole-tree hydraulic conductance, xylem embolism and water loss regulation. *Annales des Sciences Forestières*, 1996, 53(1): 113-121.
- [49] 赵平. 整树水力导度协同冠层气孔导度调节森林蒸腾. *生态学报*, 2011, 31(4): 1164-1173.
- [50] Ntshidi Z, Gush M B, Dzikiti S, Le Maitre D C. Characterising the water use and hydraulic properties of riparian tree invasions: a case study of *Populus canescens* in South Africa. *Water SA*, 2018, 44(2): 328-337.
- [51] Musil C F, Midgley G F. The relative impact of invasive Australian acacias, fire and season on the soil chemical status of a sand plain lowland fynbos community. *South African Journal of Botany*, 1990, 56(4): 419-427.
- [52] Witkowski E T F. Effects of invasive alien acacias on nutrient cycling in the coastal lowlands of the Cape fynbos. *Journal of Applied Ecology*, 1991, 28(1): 1-15.
- [53] Dallas H F, Day J A. The Effect of Water Quality Variables on Aquatic Ecosystems: A Review. Pretoria: Water Research Commission, 2004.
- [54] Nagler P L, Glenn E P, Didan K, Osterberg F J, Jordan F, Cunningham J. Wide-area estimates of stand structure and water use of *Tamarix* spp. on the lower Colorado River: implications for restoration and water management projects. *Restoration Ecology*, 2008, 16(1): 136-145.
- [55] Crous C J, Drake D C, Jacobsen A L, Pratt R B, Jacobs S M, Esler K J. Foliar nitrogen dynamics of an invasive legume compared to native non-legumes in fynbos riparian zones varying in water availability. *Water SA*, 2019, 45(1): 103-109.

- [56] Medina-Villar S, Rodríguez-Echeverría S, Lorenzo P, Alonso A, Pérez-Corona E, Castro-Díez P. Impacts of the alien trees *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle and *Robinia pseudoacacia* L. on soil nutrients and microbial communities. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 96: 65-73.
- [57] Everard M. Can management of 'thirsty' alien trees improve water security in semi-arid India? *Science of the Total Environment*, 2020, 704: 135451.
- [58] Hu Y T, Zhao P, Huang Y Q, Zhu L W, Ni G Y, Zhao X H, Huang Z H. Hydrologic balance, net primary productivity and water use efficiency of the introduced exotic *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* plantation in south-western China. *Journal of Plant Ecology*, 2019, 12(6): 982-992.
- [59] Morris J, Zhang N N, Yang Z J, Collopy J, Xu D P. Water use by fast-growing *Eucalyptus urophylla* plantations in southern China. *Tree Physiology*, 2004, 24(9): 1035-1044.
- [60] Zhou G Y, Wei X H, Luo Y, Zhang M F, Li Y L, Qiao Y N, Liu H G, Wang C L. Forest recovery and river discharge at the regional scale of Guangdong Province, China. *Water Resources Research*, 2010, 46(9): W09503.
- [61] Farley K A, Jobbágy E G, Jackson R B. Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy. *Global Change Biology*, 2005, 11(10): 1565-1576.
- [62] Fritzsche F, Abate A, Fetene M, Beck E, Weise S, Guggenberger G. Soil-plant hydrology of indigenous and exotic trees in an *Ethiopian montane* forest. *Tree Physiology*, 2006, 26(8): 1043-1054.
- [63] Ewers B E, Gower S T, Bond-Lamberty B, Wang C K. Effects of stand age and tree species on canopy transpiration and average stomatal conductance of boreal forests. *Plant, Cell & Environment*, 2005, 28(5): 660-678.
- [64] Tyynelä T M. Species diversity in *Eucalyptus camaldulensis* woodlots and miombo woodland in Northeastern Zimbabwe. *New Forests*, 2001, 22(3): 239-257.
- [65] Dickie I A, Bennett B M, Burrows L E, Nuñez M A, Peltzer D A, Porté A, Richardson D M, Rejmánek M, Rundel P W, van Wilgen B W. Conflicting values: ecosystem services and invasive tree management. *Biological Invasions*, 2014, 16(3): 705-719.
- [66] Pyšek P, Richardson D M. Traits associated with invasiveness in alien plants: where do we stand? // Nentwig W, ed. *Biological Invasions*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008: 97-125.
- [67] 刘建, 李钧敏, 余华, 何维明, 于飞海, 桑卫国, 刘国方, 董鸣. 植物功能性状与外来植物入侵. *生物多样性*, 2010, 18(6): 569-576.
- [68] Zenni R D, Lamy J B, Lamarque L J, Porté A J. Adaptive evolution and phenotypic plasticity during naturalization and spread of invasive species: implications for tree invasion biology. *Biological Invasions*, 2014, 16(3): 635-644.
- [69] Lamarque L J, Delzon S, Lortie C J. Tree invasions: a comparative test of the dominant hypotheses and functional traits. *Biological Invasions*, 2011, 13(9): 1969-1989.
- [70] Global invasive species database. [2020-07-03]. <http://www.iucngisd.org/gisd/>.
- [71] National Invasive Species Information Center (NISIC), U.S. Department of Agriculture. [2020-07-03]. <https://www.invasivespeciesinfo.gov/index.shtml>.
- [72] Invasive species compendium. [2020-07-03]. <https://www.cabi.org/isc/>.
- [73] 中国外来入侵物种数据库. [2020-07-03]. <http://www.chinaias.cn/wjPart/index.aspx>.