

DOI: 10.20103/j.stxb.202403050447

朱美菲, 韩政伟, 雷春英, 王湘莲, 程金花, 张友焱. 准噶尔盆地荒漠绿洲过渡带地下水埋深对人工梭梭林年龄结构及动态特征的影响. 生态学报, 2024, 44(19): 8688-8698.

Zhu M F, Han Z W, Lei C Y, Wang X L, Cheng J H, Zhang Y Y. Influence of groundwater depth on age structure and dynamic characteristics of artificial *H. ammodendron* forests in the transition zone of desert oasis of Junggar Basin. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(19): 8688-8698.

准噶尔盆地荒漠绿洲过渡带地下水埋深对人工梭梭林年龄结构及动态特征的影响

朱美菲¹, 韩政伟², 雷春英², 王湘莲¹, 程金花¹, 张友焱^{3,*}

1 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083

2 新疆林科院造林治沙研究所, 新疆精河荒漠生态系统国家定位观测研究站, 乌鲁木齐 830063

3 中国林业科学研究院生态保护与修复研究所, 北京 100091

摘要: 针对准噶尔盆地荒漠绿洲过渡带 3 个不同地下水埋深 (GW1=4.78 m, GW2=9.39 m, GW3=11.76 m) 条件下的人工梭梭 (*Haloxylon ammodendron*) 种群进行了深入的年龄结构特征分析, 旨在揭示种群的生存状况, 并预测种群未来的发展趋势, 为荒漠绿洲过渡带梭梭种群的经营与恢复提供理论依据。研究基于静态生命表、存活曲线对种群结构进行分析, 结合时间序列模型预测了未来 2、4、6 个龄级后种群的变化趋势。研究结果表明: (1) 3 个梭梭种群年龄结构呈金字塔型, 均为增长型种群, 其中 GW1 种群生长潜力最大, 幼龄林比例达 73%。(2) 3 个种群的存活曲线均趋近于 Deevey-II 型, 种群在各年龄段死亡率相对稳定, 地下水位的降低限制了幼苗的生长, 导致种群自疏现象提前出现。(3) 3 个种群均为易受干扰的增长型种群, 幼林数量基本可以补充由于中、老龄级个体死亡造成的缺失。对于水分补给有限的种群出现树龄大、树高小的小老树, 幼苗稀少, 种群提前进入衰退期的现象应该予以关注, 需加强对衰老龄级个体的精准抚育管理。

关键词: 人工梭梭林; 种群结构; 静态生命表; 时间序列分析

Influence of groundwater depth on age structure and dynamic characteristics of artificial *H. ammodendron* forests in the transition zone of desert oasis of Junggar Basin

ZHU Meifei¹, HAN Zhengwei², LEI Chunying², WANG Xianglian¹, CHENG Jinhua¹, ZHANG Youyan^{3,*}

1 College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Institute of Afforestation and Sand Control, Xinjiang Academy of Forestry Sciences, Xinjiang Jinghe Desert Ecosystem Research Station, Urumqi 830063, China

3 Institute of Ecological Protection and Restoration, Chinese Academy of Forestry Sciences, Beijing 100091, China

Abstract: This study conducted an in-depth analysis of the age structure characteristics of artificial *Haloxylon ammodendron* (hereafter *H. ammodendron*) populations with different groundwater depths (GW1 = 4.78 m, GW2 = 9.39 m, and GW3 = 11.76 m) in the desert-oasis transition zone of the Junggar Basin. The objective is to reveal the current survival status of the populations, predict their development trends, and provide theoretical support for the management and restoration of *Haloxylon ammodendron* populations in the desert-oasis transition zone. Based on static life tables and survival curves, the population structure was analyzed, and the future trends of the population after 2, 4, and 6 age classes were predicted using

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目 (2022YFF1302504)

收稿日期: 2024-03-05; 网络出版日期: 2024-07-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: youyanzh@caf.ac.cn

time series models. The results showed that: (1) The age structure of the three *H. ammodendron* populations exhibited a pyramidal shape, indicating growth-type populations. Among them, the GW1 population had the greatest growth potential with a juvenile forest proportion of 73%. (2) The survival curves of the three populations converged to Deevy-II type, indicating relatively stable mortality rates across different age groups. The decrease in groundwater level limited the growth of seedlings, leading to the premature occurrence of self-thinning in the population. (3) All three populations were growth-type populations susceptible to disturbance, and the number of young forests could basically replenish the deficit caused by the death of middle-aged and old-aged individuals. Attention should be paid to the phenomenon of small and senescent trees with old age and small height, sparse seedlings, and premature entry into the decline phase in populations with limited water replenishment. It is necessary to strengthen precise care and management of aging individuals.

Key Words: artificial *H. ammodendron*; population structure; static life table; time series analysis

人工林的持续发育及其生态功能的正常发挥,其核心要素在于由建群种构成的群落能否顺利实现自然更新机制^[1]。植物种群的结构及数量动态作为种群生态学领域的基础研究课题,对于深入剖析种群更新策略、群落形成和稳定的动态演变具有至关重要的科学价值^[2]。特别是种群的年龄结构,作为反映种群数量动态及其发展趋势的关键指标^[3],在揭示不同优势种群年龄结构动态特征、植被群落稳定性及演替方向时尤为关键。因此,种群年龄结构的研究对于指导生态系统的可持续经营管理具有重要的实践意义。

在荒漠生态系统中,水分作为影响植物种子萌发和实生苗更新的主导环境因子^[4],其匮乏性对荒漠植物的种群更新构成了严重挑战,而水分利用的受限性则直接影响了种群的更新能力。对于降水稀少,地表水资源匮乏的干旱区而言,地下水成为了荒漠植被不可或缺的重要水源^[5]。众多研究表明^[6-7],地下水位的变动对荒漠植物的存活具有显著影响,特别是对于梭梭而言。当沙垄高度或地下水埋深超过一定阈值时,梭梭将面临水分获取的困境,其生长与存活状况也进而受到影响^[8]。地下水超过 18 m 时,梭梭水分利用受限,种群密度降低,出现自疏现象^[9]。随地下水埋深的增加,种内关系逐渐简化,幼龄林比例也呈现降低趋势^[10],种群增长指数不断下降,甚至引发种群的衰退^[11]。当地下水埋深减小时,梭梭的生长状况会向积极的方向发展。而当水分补给的更多时,可能导致土壤通气性降低和盐碱化加剧,对梭梭的生长产生不利影响^[12]。因此,梭梭的生长需要地下水水位保持在一个特定的适宜范围内,无论是过深或过浅都不利于其生长^[8]。

荒漠绿洲过渡带是荒漠生态系统与绿洲生态系统相互交织的地带,这一区域对生态系统的退化趋势极为敏感,被视为生态脆弱带^[13]。在此复杂的生态界限中梭梭作为典型的耐旱植物,在荒漠化抵抗和生态恢复中发挥着不可替代的作用^[14]。然而,由于人为盲目毁林开荒,过度樵采和放牧,准噶尔盆地南缘大面积的天然梭梭林遭受破坏,生态系统的自我更新能力严重受损,天然梭梭种群数量锐减。为恢复这一受损的生态系统,1984 年当地政府通过飞播造林、骑马手撒播等措施人工恢复破坏的天然林。然而长期以来,由于地下水下降、放牧等对荒漠植被的严重破坏,导致大面积的人工梭梭林衰退甚至死亡。基于此,本研究旨在通过系统的野外调查与实验分析,厘清不同地下水埋深条件下梭梭种群年龄结构的差异;揭示种群年龄结构与地下水水位之间的内在联系。在此基础上,利用生态学理论和方法,对梭梭种群未来的演替趋势进行预测,以推动该区域退化梭梭种群的生态恢复与可持续发展。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于新疆博尔塔拉蒙古自治州精河县,地处天山北麓与准噶尔盆地南缘的交汇地带(东经 81°44'—83°45',北纬 40°00'—45°10')。地貌类型为山前冲积洪积倾斜平原,地形自南向北逐渐倾斜,平坦开阔。该区域属于典型的北温带干旱荒漠型大陆气候区,1 月平均气温低至 -15℃,7 月平均气温 26℃,极端最高温可达 44℃,极端最低温低至 -33℃。年降水量稀少,仅为 104 mm,年蒸发量约为 1498 mm。日照时间长,

年日照达 2700 h。研究区的主要植被包括梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)、蛇麻黄(*Ephedra sinica*)、怪柳(*Tamarix chinensis*)。20 世纪 80 年代由于天然梭梭林破坏严重,当地政府通过飞播造林、骑马手撒播等措施进行人工恢复,放牧、砍伐等人为活动的减少使种群依靠种子萌发自然更新形成梭梭林。然而长期以来,由于地下水位下降、放牧活动的恢复对人工梭梭林再次造成了严重破坏。

1.2 野外调查

如图 1 所示,本研究在天山支脉科努山沿垂直于山脉方向,由南向北设置了三个海拔梯度(240 m, 260 m, 300 m),每个海拔梯度处对应着不同深度的地下水位(GW1, GW2, GW3)。研究区地势由南向北倾斜,且地下水埋深逐渐降低,同一海拔梯度处地下水位深度相近,因此在每个海拔梯度处设置 3 个 20 m×20 m 的样方以进行重复试验,共设置 9 个样方,进行种群年龄结构及更新状况调查。对每株梭梭进行每木检尺,用胸径尺精确测量了梭梭的基径,并测定了树高和冠幅。冠幅面积=冠幅长×冠幅宽。地下水位数据(表 1)来自于附近的地下水位监测井。

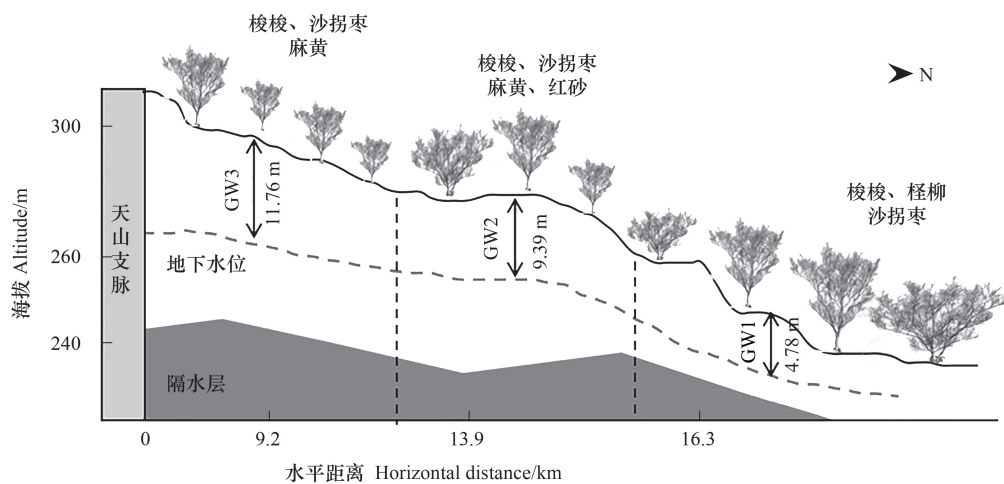


图 1 样地布设示意图

Fig.1 Schematic diagram of the layout of the sample plots

GW1: 地下水位为 4.78 m 的种群; GW2: 地下水位为 9.39 m 的种群; GW3: 地下水位为 11.76 m 的种群

表 1 梭梭种群样地概况

Table 1 Basic survey of artificial *H. ammodendron* plots

| 种群 Population | 地下水埋深 Groundwater depth/m | 种群密度 Population density/ (株/hm ²) | 海拔 Elevation/m | 平均株高 Average height/m | 平均冠幅 Crown area/m ² |
|------------------|---------------------------------|---|-------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| GW1 | 4.78 | 1794±250 | 240 | 1.04±0.41 | 2.45±3.66 |
| GW2 | 9.39 | 1081±411 | 262 | 1.15±0.49 | 1.45±1.74 |
| GW3 | 11.76 | 525±126 | 300 | 0.94±0.47 | 1.41±1.38 |

GW1: 地下水位为 4.78 m 的种群; GW2: 地下水位为 9.39 m 的种群; GW3: 地下水位为 11.76 m 的种群

1.3 种群龄级结构

由于梭梭难以形成规整的年轮,无法通过年轮确定其树龄。因此,本研究采用基径代替龄级进行分析。虽然基径不能完美替代年龄,但在相同环境条件下,同一树种的龄级和径级对环境的响应通常具有一致性^[15]。基于不同年龄径级等量增长的假设,将梭梭基径以 3 cm 一个龄级进行分株统计^[16]。共划分 7 个龄级,第 I 龄级为(0—3 cm); II 龄级(3—6 cm); III 龄级(6—9 cm); IV 龄级(9—12 cm); V 龄级(12—15 cm); VI 龄级(15—18 cm), VII 龄级(>18 cm)。

1.4 静态生命表及存活曲线

静态生命表反映了种群特定时间段内的年龄动态历程,并非全生命周期的追踪,在编制时会出现负死亡

率。对此将各龄级存活的个体数进行匀滑修正^[17],以各龄级的个体数为基础,编制静态生命表。

$$l_x = \frac{a_x}{a_0} \times 1000 \quad (1)$$

$$d_x = l_x - l_{x+1} \quad (2)$$

$$q_x = \frac{d_x}{l_x} \quad (3)$$

$$L_x = \frac{(l_x + l_{x+1})}{2} \quad (4)$$

$$T_x = L_x + L_{x+1} + \dots + L_{x+n} \quad (5)$$

$$E_x = \frac{T_x}{l_x} \quad (6)$$

$$S_x = \frac{l_{x+1}}{l_x} \quad (7)$$

$$K_x = \ln l_x - \ln l_{x+1} \quad (8)$$

式中: x 为梭梭的龄级; a_x 是在 x 龄级内,实际存活的梭梭个体数量; a_0 是指梭梭种群在初始生长阶段 I 龄级时的实际存活个体数, a_x 是经过数据平滑处理后得到的 x 龄级现存个体数; l_x 表示在 x 龄级时,梭梭的标准化存活个体数; d_x 、 q_x 、 L_x 分别表示梭梭从 x 龄级过渡到 $x+1$ 龄级期间标准化后的死亡数量、死亡率和平均存活数量; T_x 表示从 x 龄级开始,所存活至超过 x 龄级的梭梭个体总数; E_x 是预测梭梭个体在进入 x 龄级后所期望的寿命; S_x 为梭梭的存活率; K_x 表示梭梭从 x 龄级到 $x+1$ 龄级过渡过程中受到的阻力或消失率。

以龄级序列为横轴基准,采用标准化存活个体数的对数作为纵轴度量,绘制梭梭种群的存活曲线。引入 Hett 和 Loucks^[18]构建的指数函数、幂函数模型,对同样地人工梭梭种群存活曲线进行检验。通过比较模型的 R^2 、 P 值,验证种群存活状况是否符合 Deevey-II 或 Deevey-III 型曲线。

1.5 种群动态分析和时间序列预测

1.5.1 种群动态分析

采用种群动态量化方法^[2],定量描述种群动态:

$$V_n = \frac{a_n - a_{n+1}}{\max(a_n, a_{n+1})} \times 100\% \quad (9)$$

$$V_{pi} = \frac{1}{\sum_{n=1}^{k-1} a_n} \sum_{n=1}^{k-1} (a_n V_n) \quad (10)$$

$$V'_{pi} = \frac{\sum_{n=1}^{k-1} (a_n V_n)}{k \times \min(a_1, a_2, \dots, a_k) \sum_{n=1}^{k-1} a_n} \quad (11)$$

$$P_{极大} = \frac{1}{k \times \min(a_1, a_2, \dots, a_k)} \quad (12)$$

式中: V_n 表示梭梭种群从 n 级到 $n+1$ 级的个体数变化量; a_n 和 a_{n+1} 分别代表第 n 和第 $n+1$ 级种群的个体数量; k 代表年龄级数的总数; V_{pi} 和 V'_{pi} 分别表示在没有外部干扰的情况下和考虑了未来可能存在的外部干扰因素后,种群年龄结构内个体数量的变化趋势; V_n 、 V_{pi} 、 V'_{pi} 取正、负、零时分别反映种群个体数量的增长、衰退和稳定趋势; $P_{极大}$ 表示梭梭种群对外界干扰所承担的风险概率。

1.5.2 时间序列分析

采用时间序列分析中的一次移动平均法^[11]对人工梭梭种群龄级结构进行模拟和预测。

$$M_t = \frac{1}{n} \sum_{k=t-n+1}^t a_k \quad (13)$$

式中: M_t 表示未来 n 年时 t 龄级梭梭的个体数; a_k 为当前 k 龄级的种群个体数; n 表示需要预测的未来时间年限。

1.5.3 数据处理与分析

采用 Excel 2021 对数据进行整理与计算, 使用 Origin 2022 进行指数函数和幂函数模型拟合并作图, 采用 Python 绘制基径核密度图。

2 结果与分析

2.1 种群年龄结构

龄级结构分析揭示了种群的生存现状和发展趋势。由于地下水位的不同, 梭梭种群的年龄结构差异明显 (图 2)。在选定的样地中, GW1 种群共计 242 株, GW2 种群 175 株, GW3 种群 85 株, 地下水位的降低削减了种群密度。3 个梭梭种群年龄结构均呈反“J”型曲线 (图 2), 属于稳定增长型种群。为更好的对比不同种群的龄级结构, 将 7 个龄级分为 3 个生长阶段^[19], 分别对应幼龄阶段 (I—II 龄级), 中龄阶段 (III—V 龄级),

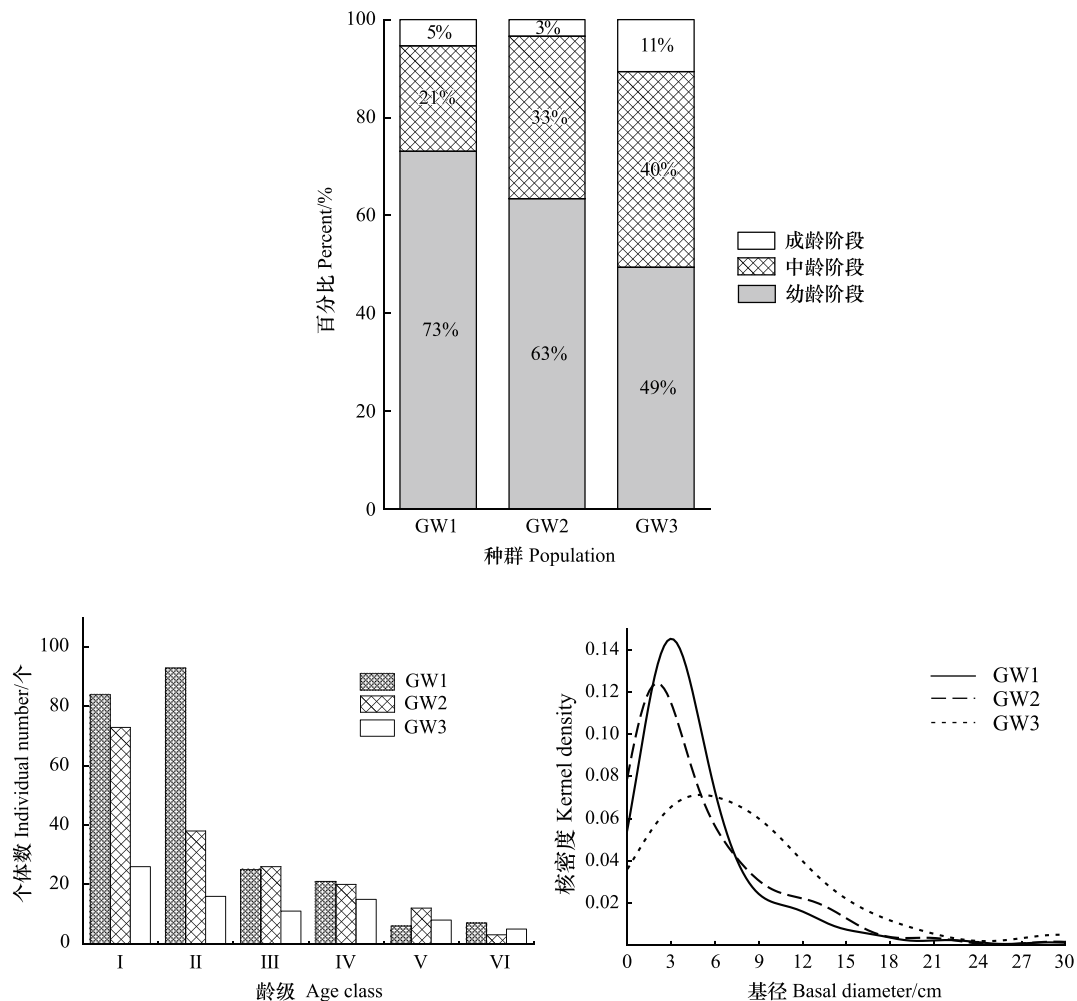


图 2 梭梭种群年龄结构

Fig.2 Age structure of *H. ammodendron* populations

I 龄级 (基径 0—3cm); II 龄级 (基径 3—6cm); III 龄级 (基径 6—9cm); IV 龄级 (基径 9—12cm); V 龄级 (12—15cm); VI 龄级 (基径 15—18cm); VII 龄级 (基径 >18cm)

成龄阶段(VI—VII龄级)。结果显示(图2),3个梭梭种群结构均呈底部宽顶部窄的金字塔型增长种群。幼龄阶段个体数量占总个体数的65.7%,其中GW1种群占73.1%,GW2占63.4%,GW3占49.4%。中龄阶段占28.7%,其中GW1占21.5%,GW2占33.1%,GW3占40%。成龄阶段占5.6%,其中GW1占5.4%,GW2占3.4%,GW3占10.6%。3个种群中GW1、GW2具有较强的增长潜力,而GW3种群年龄趋于成熟。

2.2 静态生命表和存活曲线

2.2.1 静态生命表

根据种群动态量化方法,本研究深入剖析了不同梭梭种群相邻龄级个体数量变化,以精确评估种群动态。种群静态生命表数据(表2)显示,随着梭梭年龄的增长,3个梭梭种群标准化存活个体数(l_x)均呈递减趋势。个体生命期望值(E_x)均在幼龄阶段达到最大,然后逐渐降低。图3结果显示,死亡率与消失率变化趋势相似,但消失率始终高于死亡率。GW1种群死亡率峰值出现在III龄级和VI龄级,而GW2、GW3种群死亡率峰值出现在I和IV龄级。与GW1种群不同,另外两个种群死亡率在幼龄阶段到中龄阶段并未增加,而是呈降低-增加-降低的趋势。

表2 梭梭种群静态生命表

Table 2 Static life table of *H. ammodendron* populations

| 种群 Population | 龄级 Age class | a_x | l_x | d_x | q_x | L_x | T_x | E_x | S_x | K_x |
|------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| GW1 | I | 84 | 1000 | 230 | 0.23 | 885 | 2397 | 2.40 | 0.77 | 0.26 |
| | II | 93 | 770 | 230 | 0.30 | 655 | 1511 | 1.96 | 0.70 | 0.35 |
| | III | 25 | 540 | 299 | 0.55 | 391 | 856 | 1.59 | 0.45 | 0.81 |
| | IV | 21 | 241 | 57 | 0.24 | 213 | 466 | 1.93 | 0.76 | 0.27 |
| | V | 6 | 184 | 57 | 0.31 | 155 | 253 | 1.38 | 0.69 | 0.37 |
| | VI | 7 | 126 | 57 | 0.45 | 98 | 98 | 0.77 | 0.55 | 0.61 |
| | VII | 6 | 69 | — | — | — | — | — | — | — |
| GW2 | I | 73 | 1000 | 479 | 0.48 | 760 | 1877 | 1.88 | 0.52 | 0.65 |
| | II | 38 | 521 | 164 | 0.32 | 438 | 1116 | 2.14 | 0.68 | 0.38 |
| | III | 26 | 356 | 82 | 0.23 | 315 | 678 | 1.90 | 0.77 | 0.26 |
| | IV | 20 | 274 | 110 | 0.40 | 219 | 363 | 1.33 | 0.60 | 0.51 |
| | V | 12 | 164 | 123 | 0.75 | 103 | 144 | 0.88 | 0.25 | 1.39 |
| | VI | 3 | 41 | 0 | 0.00 | 41 | 41 | 1.00 | 1.00 | 0.00 |
| | VII | 3 | 41 | — | — | — | — | — | — | — |
| GW3 | I | 26 | 1000 | 423 | 0.42 | 788 | 2692 | 2.69 | 0.58 | 0.55 |
| | II | 16 | 577 | 38 | 0.07 | 558 | 1904 | 3.30 | 0.93 | 0.07 |
| | III | 11 | 538 | 38 | 0.07 | 519 | 1346 | 2.50 | 0.93 | 0.07 |
| | IV | 15 | 500 | 192 | 0.38 | 404 | 827 | 1.65 | 0.62 | 0.49 |
| | V | 8 | 308 | 115 | 0.38 | 250 | 423 | 1.38 | 0.63 | 0.47 |
| | VI | 5 | 192 | 38 | 0.20 | 173 | 173 | 0.90 | 0.80 | 0.22 |
| | VII | 4 | 154 | — | — | — | — | — | — | — |

x : 龄级 Age class; a_x : 存活数 Survival number; l_x : 标准化存活数 Standardized survival number; d_x : 死亡数 Number of deaths; q_x : 死亡率 Mortality; L_x : x 到 $x+1$ 年龄级的平均存活个体数 The average survival individuals number from x to $x+1$ age class; T_x : 存活总数 Total survival number; E_x : 生命期望 Life expectancy; S_x : 存活率 Survival rate; K_x : 消失率 Disappearance rate; —: 表示最后一个龄级而无法计算得到的数据; I 龄级(基径 0—3cm); II 龄级(基径 3—6cm); III 龄级(基径 6—9cm); IV 龄级(基径 9—12cm); V 龄级(12—15cm); VI 龄级(基径 15—18cm); VII 龄级(基径 > 18cm)

2.2.2 存活曲线

存活曲线(图4)显示,随着龄级的递增,个体数量呈降低趋势,且下降速率波动变化。GW1种群在经历了I—II龄级相对平缓的降低后,以高于GW2和GW3种群的速率急剧下降。通过幂函数和指数函数的模拟分析发现,两种模型在不同梭梭种群间的拟合结果均达到统计学上的极显著水平($P < 0.01$)。进一步比较不同梭梭种群两种模型的拟合效果,结果显示指数模型的拟合效果更为优越,其 R^2 值普遍高于幂函数模型,且 P 值更小(如表3所示)。基于这一分析发现3个梭梭种群的存活曲线呈现出典型的Deevey-II型(对角线型)

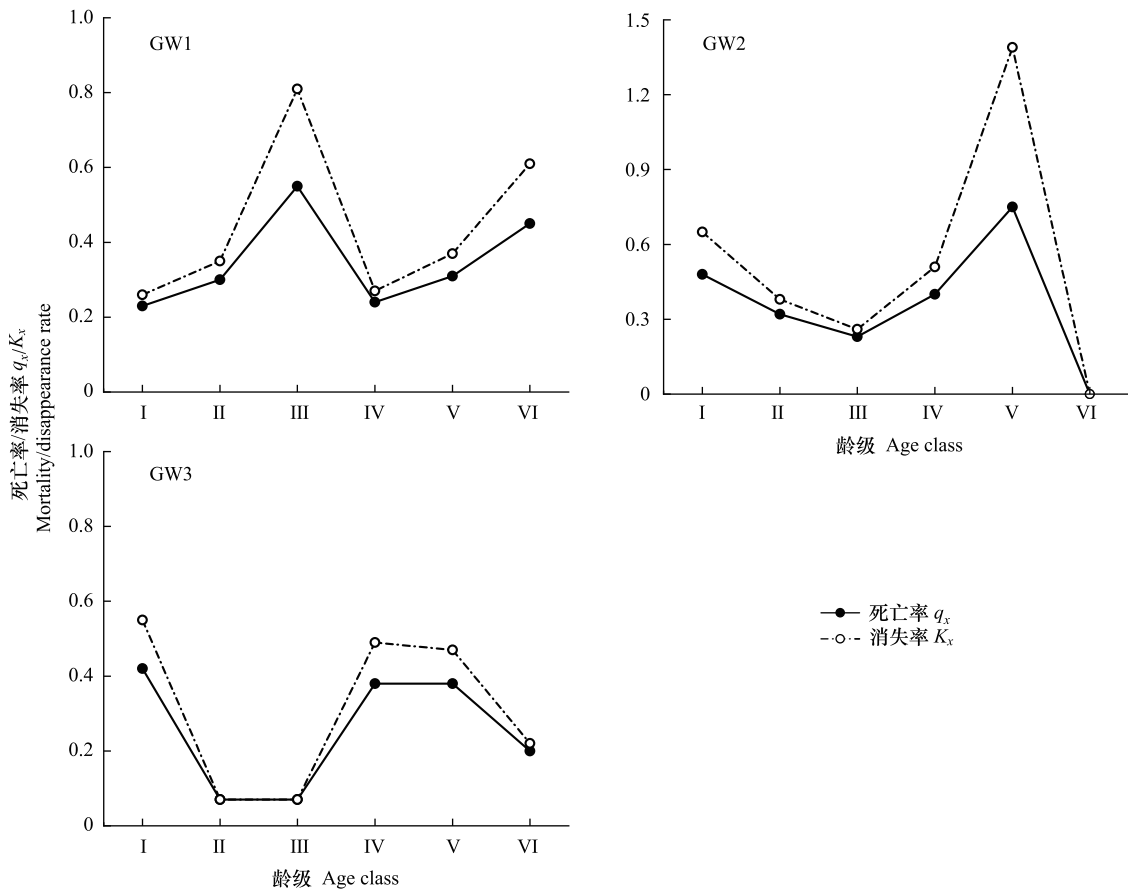


图3 梭梭种群死亡率和消失率曲线

Fig.3 Mortality and disappearance curves of *H. ammodendron* populations

特征(如图5所示),这反映出各龄级死亡率相对接近,种群在年龄结构上具有相对稳定和一致性。

2.3 种群动态指数和时间序列预测

2.3.1 种群动态指数

采用动态量化方法深入剖析梭梭种群龄级变化特征,结果如表4所示,不同梭梭种群在多数龄级均呈现增长态势。具体而言,GW1种群的 V_1 和 V_5 小于0,其他龄级均大于0,表明种群数量呈现出衰退-增长-衰退-增长的动态变化趋势。GW2种群则呈现出增长-稳定的趋势,而GW3种群则表现为增长-衰退-增长的波动趋势。无论是否考虑外界干扰因素,3个种群都归类为增长型种群。然而,在引入随机干扰的情况下,种群年龄结构动态指数 V_{pi}' 均出现显著下降,这反应出种群在面临干扰时稳定性较差,抵抗干扰能力有限,均为易受干扰型种群。值得注意的是,GW2种群的 V_{pi}' 和 P_{max} 值始终在三个种群中居于首位,表明其抗干扰能力优于GW1和GW3种群。

2.3.2 种群时间序列预测

基于各龄级存活个体数,采用一次移动平均法对未来2、4、6个龄级时间后梭梭种群各龄级的个体数进行

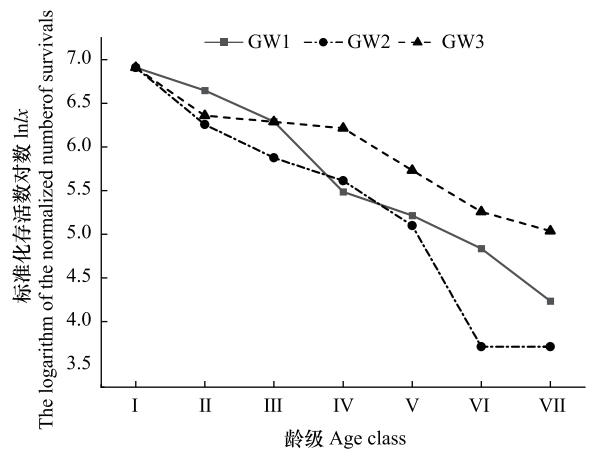


图4 梭梭种群存活曲线

Fig.4 Survival curves of *H. ammodendron* populations

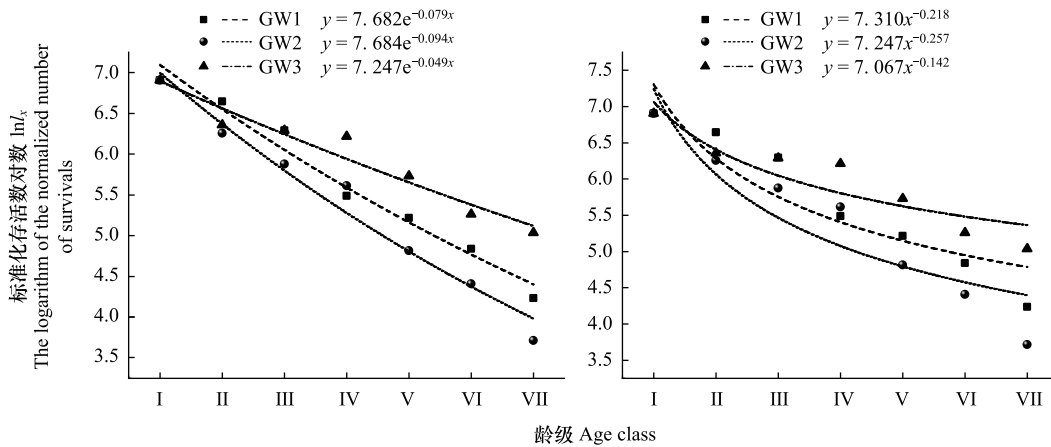


图 5 梭梭种群存活曲线拟合

Fig.5 Fitting of the survival curves of the *H. ammodendron* populations

了预测。图 6 结果显示,随着时间的推移,梭梭种群各龄级个体数普遍呈现出增加的趋势,尤其是在经历未来 6 个龄级后,GW2 种群的 VI、VII 龄级个体存活数相较于原来分别增加了 8.6 倍和 4.7 倍。虽然有个别龄级在未来 2 个龄级后出现数量减少的情况,但都能在未来 4 个龄级后补足。这一结果表明,幼林数量的增长基本可以弥补由于中、老龄级个体死亡造成的缺失,从而维持种群的整体动态平衡。

表 3 梭梭种群存活曲线检验模型

Table 3 Test models of survival cures of *H. ammodendron* populations

| 种群 Population | 拟合方程 Fitting equation | R ² | F | P |
|------------------|------------------------------|----------------|---------|-------------|
| GW1 | $y_{GW1} = 7.682e^{-0.079x}$ | 0.97 | 3863.46 | 0.000000010 |
| | $y_{GW1} = 7.310x^{-0.218}$ | 0.81 | 631.48 | 0.000000980 |
| GW2 | $y_{GW2} = 7.684e^{-0.094x}$ | 0.97 | 2476.26 | 0.000000032 |
| | $y_{GW2} = 7.247x^{-0.257}$ | 0.82 | 473.85 | 0.000001995 |
| GW3 | $y_{GW3} = 7.247e^{-0.049x}$ | 0.93 | 4327.32 | 0.000000080 |
| | $y_{GW3} = 7.067x^{-0.142}$ | 0.81 | 1498.10 | 0.000000113 |

表 4 梭梭种群年龄结构动态变化指数

Table 4 Dynamic indices of size structure on *H. ammodendron* populations

| 动态指数 Dynamic indices | GW1/% | GW2/% | GW3/% | 动态指数 Dynamic indices | GW1/% | GW2/% | GW3/% |
|-------------------------|--------|-------|--------|-------------------------|-------|-------|-------|
| V ₁ | -9.68 | 47.95 | 38.46 | V ₆ | 14.29 | 0.00 | 20.00 |
| V ₂ | 73.12 | 31.58 | 31.25 | V _{pi} | 33.48 | 40.70 | 28.48 |
| V ₃ | 16.00 | 23.08 | -26.67 | V' _{pi} | 0.80 | 1.94 | 1.02 |
| V ₄ | 71.43 | 40.00 | 46.67 | P _{max} | 0.02 | 0.05 | 0.04 |
| V ₅ | -14.29 | 75.00 | 37.50 | | | | |

V_n 为种群 n 到 n+1 级的个体数量变化;V_{pi} 和 V'_{pi} 分别表示没有外部干扰和考虑外部干扰时整个种群结构的数量变化动态指数;P 极大表示种群对外界干扰所承担的风险概率

3 讨论

3.1 梭梭种群的年龄结构及动态特征

幼苗阶段是森林更新与发展的关键且敏感时期,其生存状况直接决定了种群的更新情况^[20]。GW2 与

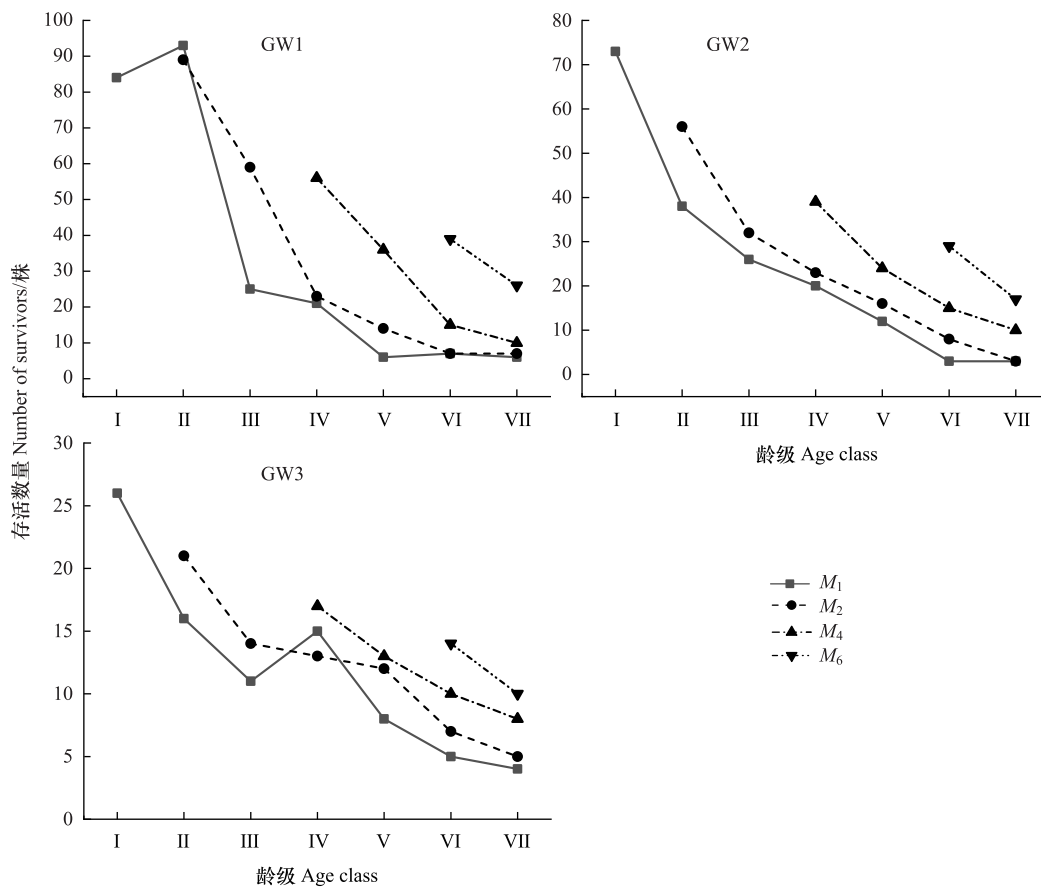


图 6 梭梭种群动态变化的时间序列预测曲线

Fig.6 Time sequence analysis of age structure of *H. ammodendron* populations

M1 表示原始数据, M2、M4、M6 分别表示未来 2、4、6 个龄级后种群的大小

GW3 种群在幼龄阶段出现了较高死亡率,这一特征与民勤绿洲荒漠过渡带的人工梭梭种群^[2]具有相似之处。幼龄植株的稀少直接导致了高龄级植株的缺失,这一阶段的高死亡率容易成为制约种群更新与持续发展的“瓶颈期”^[21]。相较之下, GW1 种群地下水补给充足,幼龄植株数量丰富,然而中期和后期出现高死亡率导致种群向中龄阶段过渡面临较大困难,同样导致了种群内成熟个体的缺失。

总体来看,准噶尔盆地荒漠绿洲过渡带不同地下水位处的梭梭种群呈现出反“J”型年龄结构曲线,这种底部宽、顶部窄的金字塔型结构表明种群整体呈增长趋势。与新疆甘家湖自然保护区的白梭梭种群^[16]以及准噶尔盆地西北缘的梭梭种群相似^[22]。这些研究均显示准噶尔地区对于梭梭属植被的生长条件相对适宜,幼林数量丰富,但成熟个体稀缺,一定程度上限制了大径级梭梭个体的存活^[23]。

3.2 不同地下水埋深对梭梭种群的影响

在干旱区,植被根区土壤水分的补给很大程度上依赖于地下水通过毛细作用的供应,地下水较深时,土壤含水量成为影响地表植被生物量的核心因素;地下水埋深较浅时,毛细作用使土壤含水量增加,为植被提供了更为充足的水分来源。值得注意的是,当地下水埋深过浅时,浅层土壤的盐碱化对植被生长具有抑制作用^[24]。对于气候干旱且地表水匮乏的干旱区来说,除降雨外,浅层地下水的毛细作用提供的水分可能是幼苗唯一的水分来源^[25]。研究表明,沙垄高度超过 10 m 及地下水位 > 25 m 都会使梭梭无法利用地下水^[8],而地下水位小于 4 m 时盐碱化程度将显著上升。研究区地下水位位于 4—12 m 之间,这意味着,在当前的地下水位条件下,梭梭可以通过毛细作用获取到水分来维持其生长且免受盐碱化带来的潜在危害。

研究结果显示,随着地下水位的降低,梭梭种群的中老龄林比例增加,幼苗比例降低,种群的生长潜力受

限。浅地下水位的 GW1 种群通常能够获得足够的水分,支持种子萌发和幼苗的生长发育。此外,较高的种群密度可以降低风速,从而避免刚出土的幼苗被风沙掩埋而死亡^[26]。然而,随着大部分幼苗进入成龄阶段,对于水分、养分的需求增加,个体竞争增加,加上种群密集使环境承载力接近极限^[27],死亡率达到峰值,导致中龄级发生自疏现象。这与乌兰布和沙漠地下水埋深 1.5—3 m 的天然梭梭种群^[28]具有相似特征。在水分补给有限的条件下,幼龄阶段就面临激烈的资源竞争,仅有部分幼苗能够过进入成龄阶段,地下水位的降低使种群自疏提前发生。此外,研究还表明,深层土壤含水量对自疏系数 β 也有显著影响^[29],且在干旱环境中种群的自疏过程更加剧烈。本研究未直接探讨土壤含水率与种群年龄结构之间的内在联系,未来研究可以进一步关注土壤含水率对梭梭种群年龄结构的影响,以更全面地揭示种群动态变化机制。

3.3 梭梭种群的发展趋势及恢复策略

随着时间的推移,梭梭种群各龄级个体数呈现出不同程度的增长态势。相较于 20 世纪 60 年代民勤荒漠绿洲过渡带^[2]人工栽植的梭梭,准噶尔盆地荒漠绿洲过渡带的梭梭种群密度更大,但幼苗比例相对较低,尤其是地下水位较深的区域。种群相对有限的抗干扰能力难以有效应对放牧、樵采、地下水位下降等人为活动的持续加强。一旦受到强烈干扰,幼龄个体数量将受到显著影响,可能导致种群个体数量的剧烈波动,甚至出现分龄断层^[28],进而加大梭梭种群衰退的风险。

在水分补给有限的种群中,出现了树龄大但树高小的“小老树”现象,幼苗数量稀少,种群提前进入衰退期,这一现象应该予以高度关注。从种群整体发展的宏观层面分析,大龄林木的自然消亡并非全然不利,反而有助于为生存力强的幼龄个体腾出上层空间^[30],进而促进种群的自疏更新机制,对种群的长远发展具有积极作用。因此,需要通过科学的人工干预措施,精准抚育衰老龄级个体,来优化梭梭种群的年龄结构,缓解水分竞争等压力,从而促进梭梭幼苗更新。对于水分补给相对充足的种群,应及时对过密种群进行择伐,剔除生长潜力有限的弱小幼苗或成熟植株,以保证各个龄级的均匀过渡。

4 结论

准噶尔盆地荒漠绿洲过渡带不同地下水埋深的梭梭种群年龄结构呈金字塔型,具有深层地下水位的梭梭种群年龄趋于成熟,但长势不佳,种群更新动力不足。3 个种群的存活曲线趋近于 Deevey- II 型,种群各年龄段死亡率相对稳定。地下水位的下降加速了种群的自疏现象。三个种群均为易受干扰的增长型种群,幼林数量丰富,基本可以补充由于中、老龄级个体死亡或种群迁出造成的缺失。但水分补给有限的种群出现树龄大、树高小的小老树,幼苗数量稀少,种群提前进入衰退期的现象需加以关注。

参考文献 (References):

- [1] 朱教君,姜凤岐,范志平,刘铁刚. 黄土高原刺槐水土保持林防护成熟与更新研究. 生态学杂志, 2004, 23(5): 1-6.
- [2] 赵鹏,徐先英,张裕年,段晓峰,邱晓娜,张雯,张俊年. 民勤绿洲荒漠过渡带人工梭梭种群年龄结构及动态. 生态学报, 2023, 43(14): 6069-6079.
- [3] 谢宗强,陈伟烈,路鹏,胡东. 濒危植物银杉的种群统计与年龄结构. 生态学报, 1999, 19(4): 523-528.
- [4] Liu H L, Shi X, Wang J C, Yin L K, Huang Z Y, Zhang D Y. Effects of sand burial, soil water content and distribution pattern of seeds in sand on seed germination and seedling survival of *Eremosparton songoricum* (Fabaceae), a rare species inhabiting the moving sand dunes of the Gurbantunggut Desert of China. *Plant and Soil*, 2011, 345(1-2): 69-87.
- [5] 韩路,冯宇,李沅楷,王雨晴,王海珍. 地下水埋深对灰胡杨叶片与土壤养分生态化学计量特征及其内稳态的影响. 植物生态学报, 2024, 48(1): 92-102.
- [6] 韩路,王海珍. 塔里木荒漠河岸林物种多样性沿地下水埋深梯度的分布格局. 生态学报, 2024, 44(2): 832-843.
- [7] 刘深思,徐贵青,陈图强,米晓军,刘燕,马健,李彦. 地下水埋深对幼龄梭梭功能性状的影响. 应用生态学报, 2022, 33(3): 733-741.
- [8] 司朗明,刘彤,刘斌,李磊. 古尔班通古特沙漠西部梭梭种群退化原因的对比分析. 生态学报, 2011, 31(21): 6460-6468.
- [9] 马全林,王继和,朱淑娟. 降水、土壤水分和结皮对人工梭梭 (*Haloxylon ammodendron*) 林的影响. 生态学报, 2007, 27(12): 5057-5067.
- [10] 史浩伯,师庆东,戴岳,周小龙,万彦博,彭磊. 克里雅河尾间绿洲胡杨种群年龄结构对地下水埋深的响应. 西北植物学报, 2021, 41

- (8): 1401-1408.
- [11] 徐梦辰, 陈永金, 刘加珍, 王丹, 刘亚琦. 塔里木河中游水文影响下的胡杨种群格局动态. 生态学报, 2016, 36(9): 2646-2655.
- [12] 柳幸爽, 杨海梅, 李明思, 许翼飞, 常玉荣. 准噶尔盆地荒漠-绿洲过渡带梭梭单株水分生长函数. 干旱区资源与环境, 2024, 38(2): 132-141.
- [13] 刘书田, 王雪梅, 赵枫. 基于 Sentinel-2 的绿洲-荒漠过渡带植被地上生物量估算. 干旱区资源与环境, 2024, 38(4): 162-170.
- [14] 苏永中, 刘婷娜. 流动沙地建植人工固沙梭梭林的土壤演变过程. 土壤学报, 2020, 57(1): 84-91.
- [15] 宋于洋, 楚光明, 胡晓静. 古尔班通古特沙漠梭梭种群径级与龄级关系的研究. 西北植物学报, 2011, 31(4): 808-814.
- [16] 蔡新斌, 吴俊侠. 甘家湖自然保护区白梭梭种群特征与动态分析. 干旱区资源与环境, 2016, 30(7): 90-94.
- [17] 张维, 焦子伟, 尚天翠, 杨允菲. 新疆西天山峡谷海拔梯度上野核桃种群统计与谱分析. 应用生态学报, 2015, 26(4): 1091-1098.
- [18] Hett J M, Loucks O L. Age structure models of Balsam Fir and Eastern Hemlock. *Journal of Ecology*, 1976, 64(3): 1029-1044.
- [19] 毛毛, 蒙仲举, 党晓宏, 赵飞燕, 王德慧, 柴享贤. 巴丹吉林沙漠东缘天然梭梭种群结构与动态特征. 干旱区研究, 2023, 40(6): 971-978.
- [20] Comita L S, Uriarte M, Thompson J, Jonckheere I, Canham C D, Zimmerman J K. Abiotic and biotic drivers of seedling survival in a hurricane-impacted tropical forest. *Journal of Ecology*, 2009, 97(6): 1346-1359.
- [21] 赵阳, 刘锦乾, 陈学龙, 杨萌萌, 曹家豪, 齐瑞, 曹秀文. 洮河上游紫果云杉种群结构特征. 植物生态学报, 2020, 44(3): 266-276.
- [22] 吕朝燕, 张希明, 刘国军, 吴俊侠, 闫海龙, 邓潮洲. 准噶尔盆地西北缘梭梭种群结构和空间格局特征. 中国沙漠, 2012, 32(2): 380-387.
- [23] 郭泉水, 郭志华, 阎洪, 王春玲, 谭德远, 马超, 何红艳. 我国以梭梭属植物为优势的潜在荒漠植被分布. 生态学报, 2005, 25(4): 848-853, 946.
- [24] Yin X W, Feng Q, Li Y, Deo R C, Liu W, Zhu M, Zheng X J, Liu R. An interplay of soil salinization and groundwater degradation threatening coexistence of oasis-desert ecosystems. *Science of the Total Environment*, 2022, 806(Part 2): 150599.
- [25] Deng W, Chen M J, Zhao Y, Yan L, Wang Y, Zhou F. The role of groundwater depth in semiarid grassland restoration to increase the resilience to drought events: A lesson from Horqin Grassland, China. *Ecological Indicators*, 2022, 141: 109122.
- [26] 刘国军, 张希明, 李建贵, 吴俊侠, 魏疆, 李剑凌, 王学文. 准噶尔盆地东南缘天然更新梭梭苗期动态生命表及生存分析. 干旱区研究, 2010, 27(1): 83-87.
- [27] Molles M C Jr. *Ecology: Concepts and Applications*. New York: McGraw-Hill company, 2000.
- [28] 张剑挥, 马全林, 李得禄, 袁宏波, 张元恺, 常丽. 乌兰布和沙漠天然梭梭种群动态及空间分布. 西北植物学报, 2023, 43(7): 1198-1207.
- [29] 赵文智, 郑颖, 张格非. 绿洲边缘人工固沙植被自组织过程. 中国沙漠, 2018, 38(1): 1-7.
- [30] 矢佳昱, 韩海荣, 程小琴, 董玲玲, 田慧霞, 蔡锰柯, 康峰峰. 河北辽河源自然保护区油松种群年龄结构和种群动态. 生态学杂志, 2017, 36(7): 1808-1814.