

地下水埋深和林分结构对胡杨林下草本植物多样性的影响

李佳¹, 魏新成², 吕慧³, 马万飞⁴, 李景文⁵, 王健铭^{5*}

(1.阿拉善盟生态环境综合服务中心, 内蒙古 阿拉善 750306; 2.额济纳旗国有林场, 内蒙古 阿拉善 735499; 3.额济纳旗林业和草原局综合保障中心, 内蒙古 阿拉善 735499; 4.额济纳旗水务局, 内蒙古 阿拉善 735400; 5.北京林业大学 生态与自然保护学院, 北京 100083)

摘要:【目的】阐明地下水埋深、林分结构和土壤理化因子对胡杨林下草本植物多样性的影响及其相对作用。【方法】以额济纳绿洲胡杨林3个代表性生境为研究对象, 基于胡杨林下草本植物多样性、地下水埋深和土壤理化性状, 解析胡杨林下草本植物多样性的主要影响因素及其作用。【结果】①草本植物物种丰富度和 Shannon-Wiener 指数与地下水埋深、平均胸径和土壤全氮量显著负相关, 但与林分密度和土壤含水率显著正相关。②地下水埋深、林分结构和土壤含水率共同调控着草本植物多样性, 三者协同解释了胡杨林下草本植物群落物种丰富度和 Shannon-Wiener 指数 37.60%和 48.60%的变异。③土壤含水率单独解释了草本植物群落物种丰富度和 Shannon-Wiener 指数 24.05%和 23.89%的变异, 是胡杨林下草本植物多样性主导因素。④地下水埋深单独解释了草本植物群落物种丰富度和 Shannon-Wiener 指数 11.14%和 12.36%的变异; 同时, 地下水埋深既可以直接影响草本植物多样性, 也可以通过影响土壤含水率来间接影响草本植物多样性。⑤平均胸径直接影响草本植物多样性, 但林分密度主要通过影响土壤含水率间接影响草本植物多样性。【结论】地下水埋深和林分结构通过调控土壤含水率决定了胡杨林下草本植物多样性的维持。

关键词: 胡杨林; 草本植物; 物种多样性; 地下水埋深; 林分结构; 土壤含水率

中图分类号: S275

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2024224

李佳, 魏新成, 吕慧, 等. 地下水埋深和林分结构对胡杨林下草本植物多样性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2025, 44(1): 82-88.

LI Jia, WEI Xincheng, LYU Hui, et al. Influence of groundwater depth and stand structure on diversity of the understory herbaceous plants in *Populus euphratica* forests[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2025, 44(1): 82-88.

0 引言

【研究意义】作为生物多样性重要组分, 物种多样性是植物群落基本特征之一, 对生态系统功能及其稳定性有着决定性影响^[1-2]。草本植物是森林生态系统中物种种类最丰富的维管束植物类群之一, 在森林植物物种总数比例最高超过 80%, 是森林群落非常重要的组成部分^[3-6], 对生态系统养分循环、动物物种生存、木本植物幼苗更新等有重要影响^[7-8]。因此, 探究森林林下草本植物多样性空间分布及其影响因素对理解森林物种共存、生物多样性维持机制和保护有重要意义^[3]。

【研究进展】近年来, 生态学就植物多样性分布格局及其影响因素开展大量研究, 并发现植物多样性受到不同环境因素的影响, 且不同环境因素的相对重

要性在不同生境类型和空间尺度上存在显著差异^[2,9-12]。水资源可利用性是干旱区植物多样性维持最为关键的限制因子^[2,13-14]。在极端干旱区绿洲, 地下水对水资源可利用性有决定性影响, 调控着植物分布、群落多样性和组成^[15-16]。林冠是森林与外界进行物质能量交换的界面, 对林下光照、温度、湿度有重要的调节作用^[17-18], 进而对林下草本植物多样性有重要影响^[3,19-20]。因此, 有必要综合探究地下水埋深、土壤和林分结构对森林林下草本植物多样性的相对影响。

额济纳胡杨林是我国西北地区代表性森林生态系统之一, 在干旱区生物多样性保护和生态系统服务功能维持方面有重大意义。然而, 受全球气候变化和人类活动加剧影响, 尤其是黑河中上游水资源利用方式改变, 导致该区水资源短缺严重, 生物多样性下降、胡杨林生态系统持续退化。从 2000 年开始, 额济纳地区开始进行生态输水以促进胡杨林绿洲恢复。额济纳绿洲植被维持高度依赖地表径流和地下水补给^[21]。因此, 上游生态输水和地下水埋深对胡杨林生物多样性维持至关重要^[19-20]。然而, 由于生态输水总量不足和输水策略的差异, 导致该区地下水埋深动态变化频

收稿日期: 2024-06-06 修回日期: 2024-09-17

基金项目: 阿拉善盟科技计划项目 (AMYY2022-06); 国家自然科学基金项目 (31570610)

作者简介: 李佳 (1986—), 女, 硕士, 研究方向为生物多样性保护。

E-mail: 308768963@qq.com

通信作者: 王健铭 (1990—), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 研究方向为生物多样性保护。E-mail: wangjm1990@bjfu.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

繁，地下水埋深存在明显的空间异质性，进而对胡杨林下植物多样性维持产生了重大影响^[21]。【切入点】然而，目前有关地下水埋深、土壤和林分结构等对胡杨林下草本植物多样性的相对作用却尚未系统研究，制约着我们对胡杨林生物多样性维持机制的认知。

【拟解决的关键问题】鉴于此，本研究以额济纳绿洲 3 个生态输水区为研究对象，获取地下水埋深、土壤理化性质、胡杨林林分结构和草本植物多样性，探讨地下水埋深和林分结构对胡杨林草本植物多样性影响及对胡杨林草本植物多样性的相对作用。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于额济纳胡杨林国家级自然保护区，境内主要植被类型胡杨林和怪柳林，主要土壤类型为非地带性的林灌草甸土，与潮土、半固定和固定风沙土交错分布。该区地处我国西北内陆腹部，气候属极端干旱区，年均温度接近 9℃，年降水量不到 40 mm，年蒸发量超过 3 000 mm^[16]。因此，胡杨林下生物多样性维持高度依赖黑河水域地下水。

1.2 调查采样设计

黑河上游对额济纳绿洲生态输水主要在每年 10 月一次年 4 月，生长季节（6—9 月）的输水量则相对有限。2017 年生长季，本研究依据额济纳胡杨林国家级自然保护区水系分布情况，选择二道桥、四道桥和七道桥 3 个区域作为调查采样区（图 1）。这 3 个区域均为研究区胡杨林集中分布区，且生态输水总量和策略存在显著差异。二道桥生态输水量相对丰富，且除了当年 10 月一次年 4 月外，在生长季可以得到一定量的生态输水；七道桥在除了当年 10 月一次年 4 月外，在生长季没有生态输水；四道桥输水量和输水持续时间最短，往往常年没有河水输入。

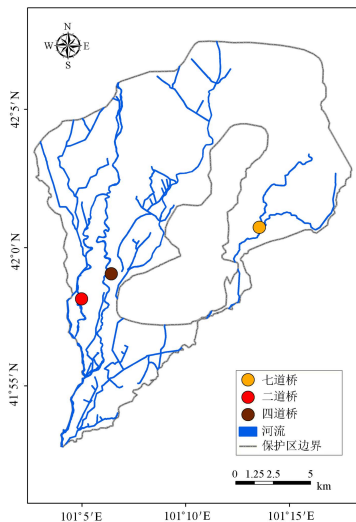


图 1 采样点分布

Fig.1 The distribution of sampling sites

在每个区域，设置 1 个由 25 个 20 m×20 m 乔木样方组成的 1 hm² 的长期监测样地。在每个乔木样方 2 条对角线设置 5 m×5 m 灌木及 1 m×1 m 草本小样方 5 个。3 个区域共计设置乔木样方 75 个，设置灌木、草本样方各 375 个。在乔木样方内，测量和记录乔木物种名称、胸径、树高、冠幅、坐标、枯枝率等。同时在草本和灌木样方内，调查和记录物种类、株数、盖度、高度、生长状况等。

最后，在每个乔木样方内依据水土异质性，采集 15~30 份 0~20 cm 土层土壤样品并混匀，剔除杂质、根系和石子，过 2 mm 筛后，带回实验室分析。利用烘干法测定土壤含水率 (Soil moisture, *SM*)，利用电导率仪测定土壤盐分 (Soil Salinity, *Salinity*, mS/cm)，利用 pH 计测定土壤 pH 值，利用重铬酸钾法测定土壤有机碳量 (Soil organic carbon content, *SOC*, g/kg)，利用凯氏定氮法测定土壤全氮量 (Soil nitrogen content, *TSN*, g/kg)，利用钼蓝比色法测定土壤全磷量 (Soil phosphorus content, *TSP*, g/kg)。

1.3 地下水埋深测定

额济纳税务局在 3 个样地正中设置了 1 眼地下水埋深观测井，并安装 2 套地下水埋深自动观测设备，每 2 h 自动记录 1 次数据。基于该套监测设备，本研究获取了全年和生长季地下水埋深，用于表征研究区地下水埋深状况。

1.4 林分结构参数选择及测定

选择平均胸径和林分密度来测定林分结构。林分密度 (Stand density, *STD*) 计算式为：

$$STD = Na/QA. \quad (1)$$

平均胸径 (Diameter at breast height, *DBH*) 计算式为：

$$DBH = \sqrt{\frac{1}{Na} \sum_{i=1}^{Na} d_i^2}, \quad (2)$$

式中：*QA* 为样方面积 (400 m²)；*Na* 为样方内个体总数；*d_i* 为第 *i* 株林木的胸径。

1.5 物种多样性指数及测定

本研究选取草本植物物种丰富度和 Shannon-Wiener 指数来表征草本植物物种多样性。物种丰富度 (Herb species richness, *HSR*) 计算式为：

$$HSR = N. \quad (3)$$

Shannon-Wiener 指数 (*SH*) 计算式为：

$$SH = -\sum_{i=1}^m p_i \log(p_i), \quad (4)$$

式中：*N* 为群落内物种总数；*P_i* 为物种 *i* 在群落的相对盖度；*m* 为群落总盖度。

1.6 数据统计分析

选择生长季节地下水埋深、土壤环境因子 (土壤含水率、土壤有机碳量、土壤全氮量、土壤全磷量)

和林分结构（林分密度和平均胸径）3 组变量作为草本植物物种多样性的解释变量。采用单因素方差分析（One-way ANOVA）检验 3 个区域地下水埋深月均值是否存在显著差异，并使用最小显著差异法（LSD, Least significant difference）进行多重比较。使用 Spearman 相关性分析检验不同环境因子间的相关性，以及草本植物多样性与地下水埋深、土壤环境因子和林分结构的相关性。最后基于多样性线性回归模型和层次分割分析草本植物多样性的主要影响因素及其作用。为了防止数据过度拟合，剔除膨胀因子 >5 的因子，同时对因子进行前向选择（ $P<0.05$ ）。最后，通过结构方程模型解析不同环境变量对胡杨林下草本植物多样性的直接和间接影响。层次分割和结构方程模型分析分别在 R 4.3.0 利用 rdacca.hp 和 lavaan 包完成^[22-23]。

2 结果与分析

2.1 不同采样区地下水埋深和林下草本植物多样性差异

由图 2 可知，不同采样区全年和生长季地下水埋深差异显著（ $P<0.05$ ）。二道桥和七道桥全年地下水埋深显著小于四道桥（ $P<0.05$ ），但二道桥和七道桥地下水埋深无显著差异（ $P>0.05$ ）。生长季 3 个采样区地下水埋深差异显著，即四道桥地下水埋深 $>$ 七道桥地下水埋深 $>$ 二道桥地下水埋深（ $P<0.05$ ）。由图 3 可知，二道桥胡杨林下草本物种丰富度和 Shannon-Wiener 指数显著高于四道桥和七道桥（ $P<0.05$ ），但四道桥和七道桥胡杨林下草本物种丰富度和 Shannon-Wiener 指数无显著差异（ $P>0.05$ ）。

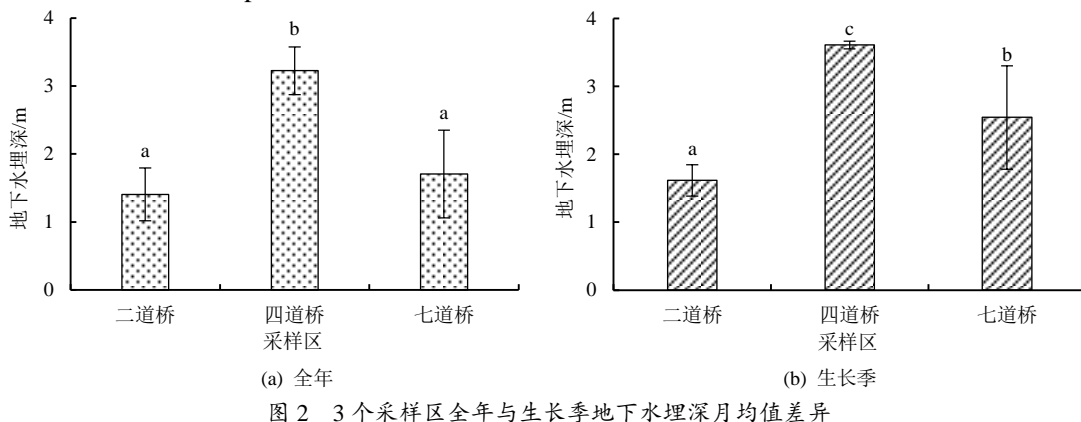


Fig.2 Difference in the monthly value of annual and growing-season groundwater depth among three sampling regions

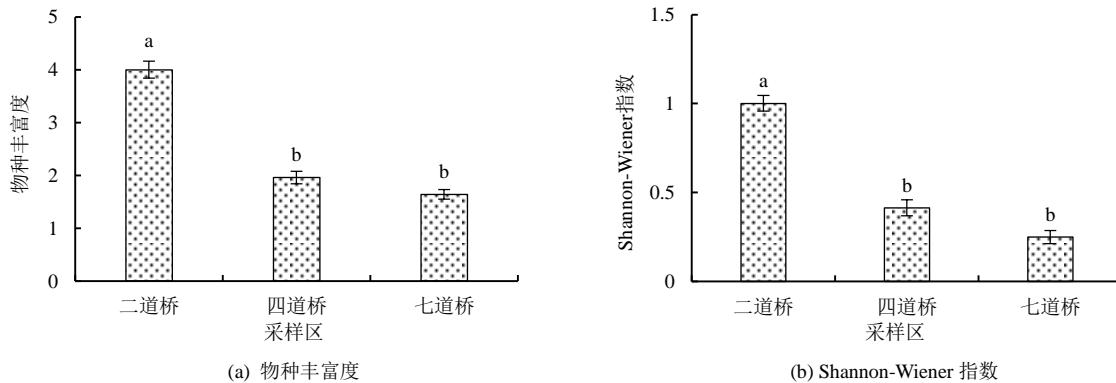


图 3 3 个采样区林下草本植物物种丰富度和 Shannon-Wiener 指数均值差异

Fig.3 Difference in the understory herb species richness and Shannon-Wiener among three sampling regions

2.2 草本植物多样性与环境因素的相关性

图 4 为胡杨林下草本植物物种丰富度和 Shannon-Wiener 指数与环境因子的相关分析。图 4 中***表示环境因子与草本植物物种丰富度或 Shannon-Wiener 指数在 $P<0.001$ 水平显著相关，**表示环境因子与草本植物物种丰富度或 Shannon-Wiener 指数在 $P<0.01$ 水平显著相关，*表示环境因子与草本植物物种丰富度或 Shannon-Wiener 指数在 $P<0.05$ 水平显著相关。由图 4 可知，草本植物群落物种丰富度和 Shannon-Wiener 指数与地下水埋深、土壤全氮量和平均胸径显

著负相关（ $P<0.01$ ），但与土壤含水率和林分密度显著正相关（ $P<0.01$ ），与土壤全磷量、土壤有机碳量、土壤盐分、土壤 pH 值相关性不显著。随着地下水埋深增加，土壤含水率和林分密度显著下降，土壤全氮量和平均胸径则显著增加（ $P<0.01$ ），土壤有机质、土壤全磷量和土壤盐分则没有显著变化。此外，土壤含水率与林分密度显著正相关，但与平均胸径显著负相关。土壤全氮量与林分密度显著负相关，但与平均胸径显著正相关（ $P<0.01$ ）。

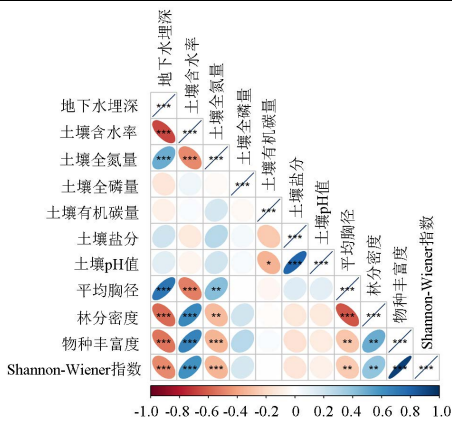


图 4 胡杨林下草本植物物种丰富度和 Shannon-Wiener 指数与环境因子的相关分析

Fig.4 Correlation analysis between herb species richness, Shannon-Wiener and environmental factors

2.3 地下水埋深和林分结构对草本植物多样性的相对影响

图 5 为胡杨林下草本植物物种丰富度和 Shannon-Wiener 指数主要影响因素及其相对作用。图 5 中***

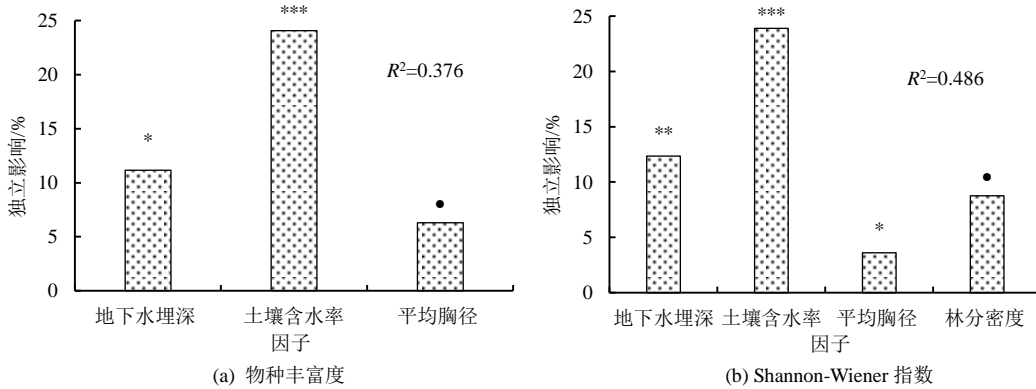


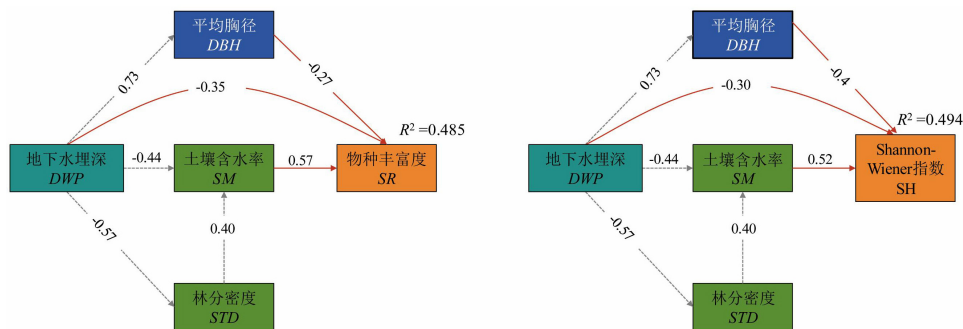
图 5 胡杨林下草本植物物种丰富度和 Shannon-Wiener 指数主要影响因素及其相对作用

Fig.5 The major drivers of herb species richness and Shannon-Wiener index and their relative effects

图 6 为环境因子对胡杨林下草本植物多样性的直接影响和间接影响，图 6 中灰色虚线代表间接效应，红色实线代表直接效应。由图 6 可知，地下水埋深、平均胸径和土壤含水率对草本植物物种丰富度和 Shannon-Wiener 指数有显著的直接作用，但林分密度对草本植物物种丰富度和 Shannon-Wiener 指数则没

表示因子对草本植物物种丰富度或 Shannon-Wiener 指数在 $P < 0.001$ 水平影响显著，**表示因子对草本植物物种丰富度或 Shannon-Wiener 指数在 $P < 0.01$ 水平影响显著，*表示因子对草本植物物种丰富度或 Shannon-Wiener 指数在 $P < 0.05$ 水平影响显著；·表示因子对草本植物物种丰富度或 Shannon-Wiener 指数影响在 $P < 0.1$ 水平影响显著。胡杨林下草本植物物种丰富度主要由地下水埋深、土壤含水率和平均胸径共同影响，而草本植物 Shannon-Wiener 指数主要由地下水埋深、土壤含水率、平均胸径和林分密度共同影响（图 5）。层次分割分析显示，这些变量共同解释了草本植物物种丰富度和 Shannon-Wiener 指数各 37.60% 和 48.60% 的空间变异，其中土壤含水率对草本植物物种丰富度和 Shannon-Wiener 指数影响最强（24.05% 和 23.89%）。地下水埋深分别单独解释了草本植物群落 2 个物种多样性指数 11.14% 和 12.36% 的变异，林分结构则分别单独解释了草本植物群落 2 个物种多样性指数 6.28% 和 12.38% 的变异。

有显著直接作用（图 6）。同时，地下水埋深可以通过调控土壤含水率、平均胸径和林分密度来间接影响草本植物物种丰富度和 Shannon-Wiener 指数。此外，林分密度可以通过影响土壤含水率来间接影响草本植物物种丰富度和 Shannon-Wiener 指数。



注 $X^2=4.332, DF=2, P=0.115, RSMEA=0.022, P=0.161, GFI=0.978, CFI=0.988$ $X^2=1.731, DF=2, P=0.431, RSMEA=0.001, P=0.485, GFI=0.991, CFI=0.998$

图 6 不同环境因子对胡杨林下草本植物多样性的直接影响和间接影响

Fig.6 The direct and indirect effect of different environmental factors on herb species richness and Shannon-Wiener index

3 讨论

林下草本植物多样性分布格局及其主要影响因素一直是生态学领域非常重要的核心议题^[24-25]。胡杨林生态系统是极端干旱区最为重要的生态系统类型之一,阐明影响胡杨林下草本植物多样性维持的主导因素对提升胡杨林生态系统保护成效有重要意义。水资源可利用性是决定干旱区生物多样性维持最重要的因素^[13-14]。额济纳地区为我国最为干旱地区之一,降水在该区属于无效降水,植物生长所需的土壤水分受气候影响极为有限,主要来源于地下水^[20,26-27]。因此,地下水被认为决定该地区植被分布和植物群落多样性维持最为关键的限制因子^[15,27]。层次分割显示,地下水埋深可以单独解释胡杨林下草本植物群落 2 个物种多样性指数 11.14% 和 12.36% 的变异。同时,结构方程模型分析显示,地下水埋深不仅对胡杨林下草本植物多样性有显著的直接作用,还可以通过调控林分结构和土壤含水率来间接影响草本植物多样性。故地下水是干旱区绿洲植物多样性维持的关键因素。在干旱区绿洲,生态输水可以改善生境质量,提升植物群落多样性,从而成为恢复和保护绿洲生物多样性的关键措施^[20-21]。本研究发现,在额济纳绿洲小范围内的 3 个生境由于生态输水差异,导致地下水埋深存在显著差异。在四道桥等缺乏长期有效输水的区域,地下水埋深持续下降会进一步降低土壤含水率,引起大量草本植物死亡。因此,当前额济纳绿洲地区生态输水总量依旧不足,生态输水措施仍有待进一步完善。

乔木层的林分结构对局域林下草本植物多样性有重要影响^[28]。例如,北京暖温带落叶阔叶林和新津文峰山马尾松林的研究都证实林分结构是林下草本植物多样性的决定性因素^[3,29]。林分结构可以改变局域光照强度、温度、空气湿度和土壤水分条件等,从而影响林下植物多样性^[28-30]。研究表明,林木平均胸径可以直接调控林下草本植物 Shannon-Wiener 指数,而林分密度则可以通过影响土壤含水率来间接调控胡杨林下草本植物物种丰富度和 Shannon-Wiener 指数。故林分结构也是影响胡杨林绿洲生物多样性维持的重要因素之一。研究表明,草本植物多样性与林木平均胸径显著负相关,但与林分密度显著正相关,这与前人^[3]研究并不一致。在干旱区胡杨林生态系统中,平均胸径较高的群落多为老龄木较多的群落,林木生长不良,乔木层难以为林下植物提供有效的庇荫环境,进而导致土壤含水率下降,导致草本植物多样性降低。林分密度对森林林下透光性有重要影响^[31]。相反,林分密度高的区域林木多为中龄木和幼龄木为主,林冠层郁闭度较高,可以有效降低林内光照强度,提升土壤含

水率,从而导致草本植物多样性增加。

土壤含水率直接影响植物生长发育^[32]。层次分割显示,土壤含水率是单独解释胡杨林下草本植物物种丰富度和 Shannon-Wiener 指数变异最多的因子,说明土壤含水率是胡杨林林下植物多样性维持的决定性因素。研究区地下水埋深和林分结构主要通过调控土壤含水率来影响植物的水资源可利用性,从而影响植物多样性^[15,27]。本研究表明,地下水埋深降低和林分密度增加会提升土壤含水率,从而增加胡杨林下草本植物多样性。实际上,地下水埋深较大、林分稀疏、土壤含水率较低的环境会产生更强的环境胁迫和生境过滤^[27],导致大量低耐受性的物种死亡或者消失,从而降低草本植物多样性。本研究表明,地下水埋深、林分结构和土壤含水率协同调控着胡杨林下草本植物多样性。

综上所述,生态输水对额济纳胡杨林生境条件和林下草本植物多样性有重要影响。然而,由于生态输水总量不足,尤其是时空分配不均,导致现有的生态输水模式并不能整体上有效促进胡杨林植物多样性更新与维持。因此建议加强上游来水补给,完善额济纳绿洲生态输水时空分配模式,尽可能促进整片额济纳胡杨林生态系生物多样性和生态系统功能持续更新与维持。

4 结论

1) 地下水埋深、林分结构和土壤含水率共调控胡杨林下草本植物多样性空间分布格局,其中土壤含水率影响更为重要。

2) 地下水埋深可直接影响胡杨林下草本植物多样性,也可以通过影响林分密度和土壤含水率来间接影响胡杨林下草本植物多样性。

3) 胡杨林的林分结构对林下草本植物多样性具有重要影响,这种影响主要通过调控土壤含水率间接实现。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 刘旻霞,南笑宁,张国娟,等. 高寒草甸不同坡向植物群落物种多样性与功能多样性的关系[J]. 生态学报, 2021, 41(13): 5 398-5 407.
LIU Minxia, NAN Xiaoning, ZHANG Guojuan, et al. Relationship between species diversity and functional diversity of plant communities on different slopes in alpine meadow[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(13): 5 398-5 407.
- [2] 王健铭,董芳宇,巴海·那斯拉,等. 中国黑戈壁植物多样性分布格局及其影响因素[J]. 生态学报, 2016, 36(12): 3 488-3 498.
WANG Jianming, DONG Fangyu, Bahai · Nasina, et al. Plant distribution patterns and the factors influencing plant diversity in the Black Gobi Desert of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(12):

- 3 488-3 498.
- [3] 邓婷婷, 魏岩, 任思远, 等. 北京东灵山暖温带落叶阔叶林地形和林分结构对林下草本植物物种多样性的影响[J]. 生物多样性, 2023, 31(7): 18-29.
- DENG Tingting, WEI Yan, REN Siyuan, et al. Effects of topography and stand structure of warm temperate deciduous broad-leaved forest on understory herb diversity in Donglingshan, Beijing[J]. Biodiversity Science, 2023, 31(7): 18-29.
- [4] WAYMAN R B, NORTH M. Initial response of a mixed-conifer understory plant community to burning and thinning restoration treatments[J]. Forest Ecology and Management, 2007, 239(1-3): 32-44.
- [5] GILLIAM F S. The herbaceous layer in forests of eastern North America[M]. Oxford: Oxford University Press, 2014.
- [6] SPICER M E, MELLOR H, CARSON W P. Seeing beyond the trees: A comparison of tropical and temperate plant growth forms and their vertical distribution[J]. Ecology, 2020, 101(4): e02 974.
- [7] THRIFFLETON T, BUGMANN H, FOLINI M, et al. Overstorey-understorey interactions intensify after drought-induced forest die-off: Long-term effects for forest structure and composition[J]. Ecosystems, 2018, 21(4): 723-739.
- [8] MULLER R N. Nutrient relations of the herbaceous layer in deciduous forest ecosystems[M]//The Herbaceous Layer in Forests of Eastern North America. Oxford: Oxford University Press, 2014: 12-34.
- [9] KREFT H, JETZ W. Global patterns and determinants of vascular plant diversity[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(14): 5 925-5 930.
- [10] WANG X P, FANG J Y, SANDERS N J, et al. Relative importance of climate vs local factors in shaping the regional patterns of forest plant richness across Northeast China[J]. Ecography, 2009, 32(1): 133-142.
- [11] HAWKINS B A, RODRÍGUEZ M Á, WELLER S G. Global angiosperm family richness revisited: Linking ecology and evolution to climate[J]. Journal of Biogeography, 2011, 38(7): 1 253-1 266.
- [12] CHENG C J, HE N P, LI M X, et al. Plant species richness on the Tibetan Plateau: Patterns and determinants[J]. Ecography, 2023(1): e06 265.
- [13] BLANCHARD G, MUNOZ F, IBANEZ T, et al. Regional rainfall and local topography jointly drive tree community assembly in lowland tropical forests of New Caledonia[J]. Journal of Vegetation Science, 2019, 30(5): 845-856.
- [14] MUSCARELLA R, URIARTE M, ERICKSON D L, et al. Variation of tropical forest assembly processes across regional environmental gradients[J]. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, 2016, 23: 52-62.
- [15] LAMONTAGNE S, COOK P G, O'GRADY A, et al. Groundwater use by vegetation in a tropical savanna riparian zone (Daly River, Australia)[J]. Journal of Hydrology, 2005, 310(1-4): 280-293.
- [16] WANG Y, WANG J M, WANG X L, et al. Dominant roles but distinct effects of groundwater depth on regulating leaf and fine-root N, P and N:P ratios of plant communities[J]. Journal of Plant Ecology, 2021, 14(6): 1 158-1 174.
- [17] 李德志, 臧润国. 森林冠层结构与功能及其时空变化研究进展[J]. 世界林业研究, 2004, 17(3): 12-16.
- LI Dezhi, ZANG Runguo. The research advances on the structure and function of forest canopy, as well as their temporal and spatial changes[J]. World Forestry Research, 2004, 17(3): 12-16.
- [18] CHMURA D. Impact of alien tree species *Quercus rubra* L. on understory environment and flora: A study of the Silesian Upland (Southern Poland)[J]. Polish Journal of Ecology, 2013, 61(3): 431-442.
- [19] 李亚飞, 于静洁, 陆凯, 等. 额济纳三角洲胡杨和多枝怪柳水分来源解析[J]. 植物生态学报, 2017, 41(5): 519-528.
- LI Yafei, YU Jingjie, LU Kai, et al. Water sources of *Populus euphratica* and *Tamarix ramosissima* in Ejina Delta, the lower reaches of the Heihe River, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2017, 41(5): 519-528.
- [20] 陈艳瑞, 尹林克, 白旭. 漫溢补水干扰后的天然胡杨群落波动特征[J]. 中国沙漠, 2009, 29(5): 891-896.
- CHEN Yanrui, YIN Linke, BAI Xu. The fluctuation characteristics of natural *Populus euphratica* community under water-overflowing disturbance[J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(5): 891-896.
- [21] 王蕾, 罗磊, 刘鹏, 等. 塔里木河中下游水分干扰对胡杨林群落物种多样性的影响[J]. 干旱区地理, 2016, 39(6): 1 275-1 281.
- WANG Lei, LUO Lei, LIU Peng, et al. Biodiversity of *Populus euphratica* communities under water disturbance in middle and lower reaches of the Tarim River[J]. Arid Land Geography, 2016, 39(6): 1 275-1 281.
- [22] LAI J S, ZOU Y, ZHANG J L, et al. Generalizing hierarchical and variation partitioning in multiple regression and canonical analyses using the rdacca.hp R package[J]. Methods in Ecology and Evolution, 2022, 13(4): 782-788.
- [23] ROSSEEL Y. Lavaan: An R package for structural equation modeling[J]. Journal of Statistical Software, 2012, 48(2): 1-36.
- [24] MURPHY S J, SALPETER K, COMITA L S. Higher β -diversity observed for herbs over woody plants is driven by stronger habitat filtering in a tropical understory[J]. Ecology, 2016, 97(8): 2 074-2 084.
- [25] JIA S H, WANG X G, HAO Z Q, et al. The effects of natural enemies on herb diversity in a temperate forest depend on species traits and neighbouring tree composition[J]. Journal of Ecology, 2022, 110(11): 2 615-2 627.
- [26] ZHAO L J, XIE C, LIU X H, et al. Water sources of major plant species along a strong climatic gradient in the inland Heihe River Basin[J]. Plant and Soil, 2020, 455(1): 439-466.
- [27] 王寅, 王健铭, 曲梦君, 等. 干旱内陆河流域植物群落构建过程及其关键驱动因素[J]. 生物多样性, 2022, 30(2): 5-20.
- WANG Yin, WANG Jianming, QU Mengjun, et al. Plant community assembly processes and key drivers in an arid inland river basin[J]. Biodiversity Science, 2022, 30(2): 5-20.
- [28] COOK J E. Structural effects on understory attributes in second-growth forests of Northern Wisconsin, USA[J]. Forest Ecology and Management, 2015, 347: 188-199.
- [29] 张柳桦, 齐锦秋, 李婷婷, 等. 林分密度对新津文峰山马尾松人工林下物种多样性和生物量的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(15): 5 709-5 717.
- ZHANG Liuhua, QI Jinqiu, LI Tingting, et al. Effects of stand density on understory plant diversity and biomass in a *Pinus massoniana* plantation in Wenfeng Mountain, Xinjin County[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(15): 5 709-5 717.
- [30] ZHANG Y X, LIU T R, GUO J P, et al. Changes in the understory diversity of secondary *Pinus tabulaeformis* forests are the result of stand density and soil properties[J]. Global Ecology and Conservation, 2021, 28: e01 628.
- [31] ZHANG W, LIU W C, XU M P, et al. Response of forest growth to C:N:P stoichiometry in plants and soils during *Robinia pseudoacacia* afforestation on the Loess Plateau, China[J]. Geoderma, 2019, 337: 280-289.
- [32] 邓哲, 姚素梅, 孟丽, 等. 不同土壤含水率对太行红豆杉幼苗生长及品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(2): 22-26, 45.
- DENG Zhe, YAO Sumei, MENG Li, et al. Effect of different soil moisture content on the growth and quality of Taihang *Taxus*[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(2): 22-26, 45.

Influence of groundwater depth and stand structure on diversity of the understory herbaceous plants in *Populus euphratica* forests

LI Jia¹, WEI Xincheng², LYU Hui³, MA Wanfei⁴, LI Jingwen⁵, WANG Jianming^{5*}

(1. Alashan League Ecological Environment Comprehensive Service Center, Alxa League 750306, China; 2. Ejina Banner State-Owned Forest Farm, Alxa League 735499, China; 3. Ejina Forestry and Grassland Bureau Comprehensive Support Center, Alxa League 735499, China; 4. Ejina Water Authority, Alxa League 735400, China; 5. School of Ecology Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: 【Objective】 *Populus euphratica* is widely grown in Xinjiang, Northwestern China. The growth and development of its understory herbaceous plants are influenced by various factors. This paper investigates how groundwater depth, soil moisture, and the stand structure affect the biodiversity of these herbaceous plants. 【Method】 The analysis was based on data on diversity of the understory plants, groundwater depth, and soil physical properties collected from three representative *Populus euphratica* forests in the Ejina Oasis. 【Result】 ① The richness and Shannon-Wiener diversity index of the herbaceous plants were negatively correlated with groundwater depth, stem diameter at the breast height (DBH), and soil nitrogen content, while they were positively correlated with stand density and soil moisture. ② Groundwater depth, stand structure, and soil moisture collectively explained 37.60% and 48.60% of the variation in species richness and the Shannon-Wiener index, respectively, indicating that these factors interact to shape the diversity of the understory herbaceous plants. ③ Soil moisture was the dominant driver, explaining 24.05% and 23.89% of the variation in species richness and the Shannon-Wiener index, respectively, and playing a key role in shaping the plant diversity. ④ Groundwater depth explained 11.14% and 12.36% of the variation in species richness and the Shannon-Wiener index, respectively, influencing the diversity both directly and indirectly through its regulation of stand structure and soil moisture. ⑤ DBH directly impacted species diversity, while stand density affected the diversity indirectly by altering soil moisture. 【Conclusion】 Groundwater depth and stand structure regulate the diversity of understory herbaceous plants primarily through their effects on soil moisture. These findings highlight the integrated roles of hydrology, stand structure, and soil physical properties in shaping the biodiversity of the herbaceous vegetation in the *Populus euphratica* forests in arid regions.

Key word: *Populus euphratica* forests; herbs; species diversity; groundwater depth; stand structure; soil moisture

责任编辑: 白芳芳

(上接第 81 页)

Enhanced soil aggregation and soil organic carbon in fluvo-aquic soil through continuous application of biochar and straws

MA Xinyu, LIU Zijian, SUN Shuchen*, TIAN Xiaofei, ZHAI Sheng, LI Tingting

(School of Geography and Environment, Liaocheng University, Liaocheng 252000, China)

Abstract: 【Objective】 Amending soil with biochar and crop straw is an effective technique to improve soil quality and agricultural productivity. This paper investigates the long-term impact of continuous application of straw and biochar on soil aggregation and soil organic carbon (SOC) content in fluvo-aquic soil. 【Method】 A four-year (2019—2023) experiment was conducted in a winter wheat and summer maize rotation system in the western Shandong Plain. Biochar and maize straw were applied annually at the start of the winter wheat season. Straw was applied at rates of 3.80 (S0.5), 7.60 (S1.0), 11.40 (S1.5), and 15.20 t/hm² (S2.0), while biochar was applied at rates of 1.14 (B0.5), 2.28 (B1.0), 3.42 (B1.5), and 4.56 t/hm² (B2.0). The control treatment (CK) involved no soil amendment. After four years, we measured the changes in soil bulk density, aggregate stability, and SOC content in the 0-10 cm and 10-20 cm soil layers. 【Result】 Both straw and biochar applications reduced soil bulk density. The soil bulk density in the 0-10 cm soil layer under B2.0 treatment and in the 10-20 cm soil layer under B1.5 treatment decreased the most compared with the corresponding soil layers of CK, with significant reductions of 9.08% and 7.97%, respectively. Both of the two straw returning methods promoted the increase of soil aggregate to a certain extent, and the improvement effect was best for >5 mm soil aggregate, and worst for 1-2 mm soil aggregate. Compared with CK, the aggregate volume of >5 mm granular soil treated with B1.0 in 0-10 cm soil layer increased the most significantly by 107.35%, and that of >5 mm granular soil treated with S1.5 in 10-20 cm soil layer increased the most significantly by 106.63%. Except for SOC content in aggregates < 0.25 mm in the 0-10 cm soil layer under S15.5 and aggregates of 1-2 mm in the 10-20 cm soil layer under B0.5, where SOC content decreased, biochar and straw application significantly increased SOC content in all other aggregate fractions and treatments. SOC content increased with the increase in biochar and straw application. 【Conclusion】 Annual applications of maize straw and biochar during the winter wheat season effectively improved soil quality by reducing bulk density, enhancing water-stable aggregates, and increasing SOC content in fluvo-aquic soil. For all treatments we compared, our results showed that applying 3.42-4.56 t/hm² of biochar is most effective for improving soil quality in the studied region.

Key words: biochar; straw returning; soil aggregates; soil organic carbon

责任编辑: 白芳芳