

# 密度调控对鲁北黄泛平原区人工林土壤 物理性质及植物多样性的影响

王立超<sup>1,2</sup>, 夏江宝<sup>1</sup>, 赵玉尧<sup>3</sup>, 陈萍<sup>1,2</sup>

(1.滨州学院 山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 山东 滨州 256603;

2.山东农业大学 林学院 泰山森林生态系统国家定位观测研究站 黄河下游森林培育国家林业和  
草原局重点实验室, 山东 泰安 271018; 3.利津县王庄沙区林场建设发展服务中心, 山东 东营 257400)

**摘要:** [目的] 分析黄泛平原林分密度调控对不同林分土壤物理性质和植物多样性的影响, 为优化林分生长, 改良土壤物理性质和增加林下植被多样性提供理论依据。[方法] 以山东省东营市利津县王庄沙区林场相同立地条件下 3 种人工林(白蜡、旱柳、白榆)为研究对象, 调查不同密度(株行距 3 m×3 m, 3 m×6 m)各林分土壤容重、孔隙度、持水量和植被生长情况。[结果] ①林分密度由 3 m×3 m 降至 3 m×6 m, 两种林分密度均可增加各林分的冠幅、胸径和树高; 林下植物生物量及其多样性, 与其他林分相比, 白榆人工林的林分因子各指标增加最为显著。②林分密度 3 m×6 m 降低了同一土层非毛管孔隙度, 增加了同一土层毛管孔隙度和总孔隙度。③林分密度 3 m×6 m 显著提高了白蜡、旱柳、白榆 3 种人工林 0—20 cm 土层的饱和持水量和毛管持水量( $p < 0.05$ ), 显著提高了白榆人工林 20—40 cm 土层的土壤质量含水量( $p < 0.05$ )。[结论] 低林分密度调控, 白榆人工林林下植物生物量、多样性的增加最明显; 白蜡人工林林下土壤毛管孔隙度和总孔隙度提高最明显; 白蜡、白榆、旱柳人工林 0—20 cm 土层的土壤饱和持水量和毛管持水量均显著提高, 且白榆人工林 20—40 cm 土层的土壤质量含水量的提高显著。

**关键词:** 人工林; 林分密度调控; 土壤物理性质; 林下植物多样性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)03-0043-06

中图分类号: S725.6

**文献参数:** 王立超, 夏江宝, 赵玉尧, 等. 密度调控对鲁北黄泛平原区人工林土壤物理性质及植物多样性的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(3): 43-48. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.03.007; Wang Lichao, Xia Jiangbao, Zhao Yuyao, et al. Effects of plant density regulation on soil physical properties and plant diversity of plantations in Yellow River flood plain of Northern Shandong Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(3): 43-48.

## Effects of Plant Density Regulation on Soil Physical Properties and Plant Diversity of Plantations in Yellow River Flood Plain of Northern Shandong Province

Wang Lichao<sup>1,2</sup>, Xia Jiangbao<sup>1</sup>, Zhao Yuyao<sup>3</sup>, Chen Ping<sup>1,2</sup>

(1. Shandong Key Laboratory of Eco-environmental Science for Yellow River Delta,

Binzhou University, Binzhou, Shandong 256603, China; 2. Taishan Forest Ecosystem

Research Station, Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration for Silviculture of the Lower Yellow River, College of Forestry, Shandong Agriculture University, Taian, Shandong 271018, China;

3. Wangzhuang Forest Farm Construction and Development Service Center of Lijin County, Dongying, Shandong 257400, China)

**Abstract:** [Objective] The effects of plant density regulation on soil physical properties and plant diversity of different plant stands in the Yellow River flood plain were analyzed in order to provide a theoretical basis for optimizing stand growth, improving soil physical properties, and increasing understory vegetation diversity. [Methods] Three plantations (*Fraxinus chinensis*, *Salix matsudana*, *Ulmus pumila*) growing under the

收稿日期: 2021-11-13

修回日期: 2021-12-07

资助项目: 山东省农业科技资金(林业科技创新)课题“滨海盐碱地森林植被生态修复关键技术与示范”(2019LY006); 泰山学者工程专项(TSQN201909152)

第一作者: 王立超(1996—), 男(汉族), 吉林省大安市人, 硕士研究生, 研究方向为植被恢复与生态修复。Email: Lichw666@163.com.

通信作者: 夏江宝(1978—), 男(汉族), 山东省安丘市人, 教授, 主要从事植被恢复与生态修复研究。Email: xiajb@163.com.

same site conditions in the Wangzhuang Forest Farm, Lijin County, Dongying City, Shandong Province were selected as the research objects. The soil bulk density, porosity, water-holding capacity, and vegetation growth of different stand densities (3 m×3 m, 3 m×6 m) were investigated. [Results] ① Reducing stand density to 3 m×6 m increased crown width, diameter at breast height, and tree height of each stand, as well as the biomass and diversity of understory plants. The increase of each stand factor index in the *U. pumila* plantation was significantly greater than observed for the other stands. ② The stand density of 3 m×6 m reduced the non-capillary porosity of the same soil layer, and increased the capillary porosity and total porosity of the same soil layer. ③ The stand density of 3 m×6 m significantly increased the saturated water-holding capacity and capillary water-holding capacity of the 0—20 cm soil layer in *F. chinensis*, *S. matsudana*, and *U. pumila* plantations ( $p<0.05$ ), and significantly increased the soil moisture content of the 20—40 cm soil layer in the *U. pumila* plantation ( $p<0.05$ ). [Conclusion] Decreasing stand density resulted in a significant increase in biomass and diversity of understory plants in the *U. pumila* plantation, and soil capillary porosity and total porosity in the *F. chinensis* plantation were also increased significantly. Decreasing stand density also significantly increased soil saturated water-holding capacity and capillary water-holding capacity in the 0—20 cm soil layer of *F. mandshurica*, *U. pumila*, and *S. matsudana* plantations, and soil water content in the 20—40 cm soil layer of the *U. pumila* plantation was also significantly increased.

**Keywords:** artificial forest; forest density control; soil physical properties; plant diversity

鲁北黄泛平原地区长期遭受风沙和水土流失的危害<sup>[1]</sup>,自 20 世纪 50—60 年代起,该地区陆续营造了大量的人工防护林<sup>[2]</sup>。这些人工防护林在防风固沙和水土保持方面曾经发挥了巨大作用,但由于不少人工防护林种植密度不合理,导致林木生长不良,林木间竞争激烈,出现林高生长停滞,林地植被稀少等问题<sup>[3]</sup>,最终影响了防护林的综合效益的发挥。目前关于林分密度调控对人工林的影响,在北方主要集中在杉木人工林<sup>[4-5]</sup>、松树人工林<sup>[6-7]</sup>,且大多研究密度调控对其林木本身生长<sup>[8-9]</sup>及林地土壤养分<sup>[10-11]</sup>、植被多样性<sup>[12-13]</sup>、土壤化学性质<sup>[14-15]</sup>的影响,但林分密度调控对于其林地土壤物理性质的研究相对较少且其关系不明确。林分密度调控是通过改变林木所占空间<sup>[16]</sup>,间接控制光线和水分截留<sup>[17]</sup>,影响林下植被生长和土壤性质;林地土壤物理性质变化可直接反映林分密度对其土壤产生的影响<sup>[18]</sup>。侯磊等<sup>[19]</sup>研究表明,高林分密度的林地双子叶植物科数目减小,优势种为忍冬科;中林分密度的单子叶植物数目最少,优势种为菊科;中、高林分密度不利于土壤质量提升,应采取间伐抚育措施;低林分密度的优势种为豆科和蔷薇科;灌木层和草本层生物量随林分密度的增大而减小,利于土壤质量提升。因此林分密度调控对于人工林生长以及林地植物生长及土壤物理性质的研究具有重要意义,然而涉及黄泛区人工林分密度调控对其林下植被多样性的研究较少<sup>[20]</sup>。

本研究以王庄沙区林场初始立地条件相同的白蜡、旱柳、白榆 3 种 8 a 林龄的人工林为研究对象,

探究不同林分密度(3 m×3 m, 3 m×6 m)对各林分土壤物理性质和林下植物多样性的影响,旨在为黄泛平原区人工林的林分密度调控对优化林分生长、改良土壤物理性质和增加林下植被多样性的作用研究提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于山东省东营市利津县王庄沙区林场(118°16′01″—118°18′20″E, 37°34′08″—37°35′52″N),地处华北坳陷带,属暖温带半湿润季风气候,海拔 8~9 m。年平均气温 13.3 ℃,极端高温 39.9 ℃,极端低温 -20.2 ℃;年均日照 2 834.7 h,年平均降雨量 526.2 mm;无霜期平均为 215 d,四季分明。土壤为潮土土类,质地以沙质土为主,土壤机械组成为砂粒:粉粒:黏粒=60%:30%:10%,含盐量 <1.5‰,pH 值 7.5~8.0。主要造林树种为白蜡(*Fraxinus chinensis*)、白榆(*Ulmus pumila*)、旱柳(*Salix matsudana*),林地草本植物以蒺藜(*Tribulus terrester*)、狼尾草(*Pennisetum alopecuroides*)、沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)、野艾蒿(*Artemisia lavandulaefolia*)等为主。

### 1.2 样地设置

于 2020 年 9 月 5 日至 9 月 10 日,在 8 a 林龄的白蜡、白榆、旱柳 3 种人工林内,分别选取 2018 年 1 月林分密度调控(MT)的 3 块重复标准样地(林分密度均为 3 m×6 m);同时,在上述 3 种人工林内,

分别选取3块未密度调控(林分密度为3 m×3 m)的标准样地为对照样地(CK)(见表1)。所有标准样地面积均为20 m×20 m,共计18块,并在每块标准样地内随机选择5个1 m×1 m样方,用于林下植被调查。

表1 鲁北黄泛平原区样地概况

| 林分类型  | 面积/hm <sup>2</sup> | 处理时间                            | 林分密度                      |
|-------|--------------------|---------------------------------|---------------------------|
| 白蜡人工林 | 3.90               | 2012年生长至2018年, 2018年间伐,生长至2021年 | 株行距为<br>3 m×6 m<br>(隔行间伐) |
| 旱柳人工林 | 3.25               |                                 |                           |
| 白榆人工林 | 4.45               |                                 |                           |
| 白蜡人工林 | 4.55               | 未间伐,生长时间为<br>2012—2021年         | 株行距为<br>3 m×3 m           |
| 旱柳人工林 | 2.95               |                                 |                           |
| 白榆人工林 | 4.89               |                                 |                           |

### 1.3 土壤样品采集及测定

以“S”型取样法对各人工林标准地进行取样,选取大致均匀分布的5个样点,每个样点分别采取0—20,20—40 cm土壤,采用烘干法<sup>[21]</sup>测定土壤含水量,利用环刀法<sup>[21]</sup>测定土壤容重、土壤孔隙度及饱和持水量和毛管持水量。

### 1.4 植物样品采集及生物量测定

在每块标准样地内随机设置5个1 m×1 m样方,对林下植被种类、株数、冠幅、盖度进行记录;调查结束后将样方内所有植物地上部分进行收割,测定其鲜重并带回实验室进行后续分析。

林下植物生物量测定采用“烘干法”,即将植物放置烘箱,于105℃下杀青15 min,然后在65℃下烘7~8 h至恒重,称其重量。

### 1.5 数据分析

根据调查内容,对林地植物物种多样性指数的Margalef指数、Simpson指数和Shannon-Wiener指数、Pielou均匀度指数进行计算,计算公式<sup>[22]</sup>如下:

$$\text{Margalef指数}(Ma): Ma = (S - 1) / \ln N \quad (1)$$

式中: $S$ 是样方内物种数; $N$ 为样方中物种个体总数。

$$\text{Simpson指数}(D): D = 1 - \sum_{i=1}^s P_i^2 \quad (2)$$

$$\text{Shannon-Wiener指数}(H'): H' = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i \quad (3)$$

$$\text{Pielou均匀度指数}(E): E = H' / \ln S \quad (4)$$

式中: $P_i$ 为种*i*的相对优势度。

数据处理采用Excel 2007和SPSS 26软件进行

单因素方差分析(one-way ANOVA),Duncan法多重比较,Pearson相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 密度调控前后的林分因子

由表2可知,林分密度由3 m×3 m降至3 m×6 m促进了各林分的平均胸径、树高、冠幅的生长,其中白榆人工林在调控前后变化明显,达到了显著水平( $p < 0.05$ )。

表2 鲁北黄泛平原区林分密度调控前后的生长指标

| 林分类型  | 胸径/cm                        | 树高/cm                     | 冠幅/cm                    |
|-------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 白蜡人工林 | CK (13.30±2.46) <sup>a</sup> | (9.10±0.45) <sup>a</sup>  | (4.04±0.67) <sup>a</sup> |
|       | MT (14.38±1.64) <sup>a</sup> | (9.50±0.97) <sup>a</sup>  | (4.48±0.43) <sup>a</sup> |
| 旱柳人工林 | CK (14.93±1.00) <sup>a</sup> | (8.88±0.32) <sup>a</sup>  | (2.46±0.43) <sup>a</sup> |
|       | MT (15.00±2.19) <sup>a</sup> | (8.97±0.45) <sup>a</sup>  | (2.78±0.44) <sup>a</sup> |
| 白榆人工林 | CK (11.70±2.22) <sup>b</sup> | (10.51±0.81) <sup>b</sup> | (3.16±0.67) <sup>b</sup> |
|       | MT (16.53±2.83) <sup>a</sup> | (12.61±0.99) <sup>a</sup> | (5.04±0.72) <sup>a</sup> |

注:①数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示同一林分密度调控后差异显著( $p < 0.05$ )。②CK为对照,MT为密度调控。下同。

### 2.2 密度调控前后的林下植物种类及生物量

由表3可知,不同林分在密度调控后,林地植物种类及生物量均表现为MT>CK,即植物种类和生物量均随林分密度减小而明显增加。不同林分密度调控后,林下植物种类增加幅度表现为:白榆(40.00%)>旱柳(33.33%)>白蜡(25.00%);生物量增加幅度表现为:白榆(110.00%)>旱柳(90.00%)>白蜡(75.00%)。这表明林分密度降低至3 m×6 m,对于白榆的林地植物生长及种类增加最有成效。

### 2.3 密度调控前后的林下植物多样性指数

由表4可知,不同林分在密度调控后,林下植物多样性指数(Margalef指数、Simpson指数、Shannon-Wiener指数、Pielou均匀度指数)均表现为:MT>CK,即植物多样性指数均随林分密度减小而增加。不同林分密度调控后,林下植物多样性指数的增幅相比较,Margalef指数:白榆(65.31%)>旱柳(57.97%)>白蜡(3.57%);Simpson指数:白榆(203.36%)>白蜡(11.41%)>旱柳(4.75%);Shannon-Wiener指数:白榆(180.66%)>旱柳(61.66%)>白蜡(27.13%);Pielou均匀度指数:白榆(132.77%)>旱柳(40.51%)>白蜡(30.38%)。这表明林分密度降低至3 m×6 m,白榆人工林的林下植被多样性增加幅度最大。

表 3 鲁北黄泛平原区林分密度调控前后的林下植物种类及其生物量

| 植物名称                                  | 白蜡人工林 |       | 旱柳人工林 |       | 白榆人工林 |       |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                       | CK    | MT    | CK    | MT    | CK    | MT    |
| 附地菜( <i>Trigonotis peduncularis</i> ) | √     | √     |       |       | √     | √     |
| 狗尾草( <i>Setaria viridis</i> )         | √     | √     | √     | √     | √     | √     |
| 中华苦苣菜( <i>Ixeris chinensis</i> )      | √     | √     |       |       | √     | √     |
| 马齿苋( <i>Portulaca oleracea</i> )      | √     | √     |       | √     | √     | √     |
| 小蓬草( <i>Erigeron canadensis</i> )     | √     | √     | √     | √     |       | √     |
| 天蓝苜蓿( <i>Medicago lupulina</i> )      | √     | √     |       |       |       |       |
| 马唐( <i>Digitaria sanguinalis</i> )    | √     | √     | √     | √     | √     | √     |
| 牛筋草( <i>Eleusine indica</i> )         | √     | √     |       |       | √     | √     |
| 铁苋菜( <i>Acalypha australi</i> )       | √     | √     |       |       |       |       |
| 小叶栎( <i>Quercus chenii</i> )          | √     | √     |       |       | √     | √     |
| 白茅( <i>Imperata cylindrica</i> )      | √     |       | √     | √     | √     | √     |
| 鹅绒藤( <i>Cynanchum chinense</i> )      | √     |       |       |       |       |       |
| 莎草( <i>Cyperus rotundus</i> )         |       | √     |       | √     | √     | √     |
| 小叶杨( <i>Populus simonii</i> )         |       | √     |       |       |       |       |
| 朝天委陵菜( <i>Potentilla supina</i> )     |       | √     |       |       |       |       |
| 茵陈蒿( <i>Artemisia capillaris</i> )    |       | √     | √     |       |       |       |
| 虎尾草( <i>Chloris virgata</i> )         |       | √     |       |       |       | √     |
| 稗草( <i>Echinochloa crus-galli</i> )   |       |       | √     | √     | √     |       |
| 碎米莎草( <i>Cyperus iria</i> )           |       |       |       | √     |       |       |
| 细叶结缕草( <i>Zoysia pacifica</i> )       |       |       |       |       |       | √     |
| 芦苇( <i>Phragmites australis</i> )     |       |       |       |       |       | √     |
| 猪毛菜( <i>Salsola collina</i> )         |       |       |       |       |       | √     |
| 合计种数                                  | 12    | 15    | 6     | 8     | 10    | 14    |
| 合计生物量 kg/m <sup>2</sup>               | 0.02  | 0.035 | 0.001 | 0.010 | 0.05  | 0.105 |

注:表中“√”表示样地内存在此植物种。

表 4 鲁北黄泛平原区林分密度调控前后的林地植物多样性指数

| 林分种类  |    | Ma   | D    | H'   | E    |
|-------|----|------|------|------|------|
| 白蜡人工林 | CK | 4.04 | 0.82 | 2.17 | 0.67 |
|       | MT | 4.18 | 0.92 | 2.76 | 0.87 |
| 旱柳人工林 | CK | 2.85 | 0.67 | 1.24 | 0.40 |
|       | MT | 4.51 | 0.71 | 2.00 | 0.56 |
| 白榆人工林 | CK | 1.13 | 0.24 | 0.55 | 0.24 |
|       | MT | 1.87 | 0.72 | 1.54 | 0.55 |

注:表中 Ma, D, H', E 分别代表 Margalef 指数、Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数、Pielou 均匀度指数。

表 5 鲁北黄泛平原区林分密度调控前后的土壤容重

| 土层/cm | 白蜡人工林                     |                           | 旱柳人工林                     |                           | 白榆人工林                     |                           |
|-------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
|       | CK                        | MT                        | CK                        | MT                        | CK                        | MT                        |
| 0—20  | (1.36±0.03) <sup>As</sup> | (1.33±0.10) <sup>As</sup> | (1.32±0.12) <sup>As</sup> | (1.34±0.04) <sup>As</sup> | (1.19±0.14) <sup>Ab</sup> | (1.27±0.13) <sup>As</sup> |
| 20—40 | (1.38±0.01) <sup>As</sup> | (1.43±0.03) <sup>As</sup> | (1.44±0.03) <sup>As</sup> | (1.39±0.15) <sup>As</sup> | (1.44±0.02) <sup>As</sup> | (1.40±0.10) <sup>As</sup> |

注:数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同土层容重影响差异显著( $p < 0.05$ ),相同大写字母表示同一林分密度调控对同一土层容重影响无显著差异( $p > 0.05$ )。下同。

## 2.5 密度调控前后的土壤孔隙度

由表 6 可知,林分密度降低对各林分各土层的非毛管孔隙度、毛管孔隙度、总孔隙度的影响均未达到显著差异水平( $p > 0.05$ ),但均降低了同一土层非毛管孔隙度,增加了同一土层毛管孔隙度和总孔隙度。从不同

## 2.4 密度调控前后的土壤容重

由表 5 可知,不同林分在密度调控前后,其林地土壤容重均随土层加深而增加,其中白榆人工林在密度调控前不同土层的土壤容重差异显著( $p < 0.05$ )。林分密度降低减小了白蜡人工林 0—20 cm,旱柳人工林和白蜡人工林 20—40 cm 土层的土壤容重,增加了白蜡人工林 20—40 cm,旱柳人工林和白榆人工林 0—20 cm 土层的土壤容重,但对该影响均未达到显著差异( $p > 0.05$ )。

土层来看,林分密度降低未使得各人工林 20—40 cm 土层的土壤孔隙度较 0—20 cm 土层的土壤孔隙度显著变化( $p > 0.05$ )。不同林分比较,密度降低对白蜡人工林的总孔隙度影响大于白榆人工林和旱柳人工林。



表 6 鲁北黄泛平原区林分密度调控前后的土壤孔隙度

| 孔隙类型/% | 土层/cm | 白蜡人工林                      |                            | 旱柳人工林                      |                            | 白榆人工林                      |                            |
|--------|-------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
|        |       | CK                         | MT                         | CK                         | MT                         | CK                         | MT                         |
| 非毛管孔隙度 | 0—20  | (1.13±0.48) <sup>Aa</sup>  | (1.06±0.42) <sup>Aa</sup>  | (1.19±0.41) <sup>Aa</sup>  | (1.17±0.37) <sup>Aa</sup>  | (0.86±0.44) <sup>Aa</sup>  | (0.80±0.42) <sup>Aa</sup>  |
|        | 20—40 | (1.73±0.02) <sup>Aa</sup>  | (1.71±0.01) <sup>Aa</sup>  | (1.53±0.05) <sup>Aa</sup>  | (1.34±0.91) <sup>Aa</sup>  | (1.52±0.26) <sup>Aa</sup>  | (1.38±0.02) <sup>Aa</sup>  |
| 毛管孔隙度  | 0—20  | (47.72±1.17) <sup>Aa</sup> | (48.87±3.91) <sup>Aa</sup> | (48.17±1.68) <sup>Aa</sup> | (49.17±1.15) <sup>Aa</sup> | (49.77±1.10) <sup>Aa</sup> | (51.56±5.49) <sup>Aa</sup> |
|        | 20—40 | (44.34±0.95) <sup>Ab</sup> | (45.91±3.09) <sup>Ab</sup> | (43.90±3.95) <sup>Aa</sup> | (46.04±6.41) <sup>Aa</sup> | (44.38±4.82) <sup>Aa</sup> | (45.66±3.62) <sup>Aa</sup> |
| 总孔隙度   | 0—20  | (48.85±1.76) <sup>Aa</sup> | (49.93±3.76) <sup>Aa</sup> | (49.36±1.36) <sup>Aa</sup> | (50.34±3.80) <sup>Aa</sup> | (50.63±1.08) <sup>Aa</sup> | (52.36±4.77) <sup>Aa</sup> |
|        | 20—40 | (46.07±1.77) <sup>Aa</sup> | (47.62±1.19) <sup>Aa</sup> | (45.43±4.42) <sup>Aa</sup> | (47.38±5.52) <sup>Aa</sup> | (45.90±4.94) <sup>Aa</sup> | (47.04±3.69) <sup>Aa</sup> |

## 2.6 密度调控前后的土壤持水量及质量含水量

由表 7 可知,在 0—20 cm 土层,林分密度降低,显著提高了白蜡、旱柳、白榆 3 种人工林的土壤饱和持水量和毛管持水量( $p < 0.05$ ),且饱和持水量和毛管持水量的增加幅度均为,白榆 > 白蜡 > 旱柳;同时,显著增加了白榆人工林土壤质量含水量( $p < 0.05$ )。在 20—40 cm 土层,林分密度降低,显著提高了旱柳人

工林土壤饱和持水量和毛管持水量( $p < 0.05$ ),却均显著降低了白蜡、白榆两种人工林的土壤饱和持水量、毛管持水量,显著增加了土壤质量含水量( $p < 0.05$ )。

林分密度降低,均显著提高了白蜡、旱柳、白榆 3 种人工林 0—20 cm 土层的饱和持水量和毛管持水量( $p < 0.05$ ),以及显著提高了白榆人工林 20—40 cm 土层的土壤质量含水量( $p < 0.05$ )。

表 7 鲁北黄泛平原区林分密度调控前后的土壤持水量及含水量

| 土壤水分/%  | 土层/cm | 白蜡人工林                      |                            | 旱柳人工林                      |                            | 白榆人工林                      |                            |
|---------|-------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
|         |       | CK                         | MT                         | CK                         | MT                         | CK                         | MT                         |
| 饱和持水量   | 0—20  | (30.97±1.18) <sup>Ba</sup> | (35.52±5.09) <sup>Aa</sup> | (34.00±0.16) <sup>Ba</sup> | (35.67±2.06) <sup>Aa</sup> | (26.54±0.13) <sup>Bb</sup> | (35.69±3.42) <sup>Aa</sup> |
|         | 20—40 | (31.90±1.03) <sup>Aa</sup> | (28.07±1.03) <sup>Bb</sup> | (27.35±0.14) <sup>Bb</sup> | (30.89±2.18) <sup>Ab</sup> | (38.23±0.13) <sup>Aa</sup> | (32.23±1.81) <sup>Bb</sup> |
| 毛管持水量   | 0—20  | (30.19±0.16) <sup>Ba</sup> | (34.17±2.87) <sup>Aa</sup> | (33.10±0.17) <sup>Ba</sup> | (34.80±2.26) <sup>Aa</sup> | (25.58±0.09) <sup>Bb</sup> | (35.27±1.00) <sup>Aa</sup> |
|         | 20—40 | (30.35±1.85) <sup>Aa</sup> | (27.37±1.49) <sup>Bb</sup> | (26.08±0.14) <sup>Bb</sup> | (29.97±2.73) <sup>Ab</sup> | (39.02±0.28) <sup>Aa</sup> | (31.14±1.78) <sup>Bb</sup> |
| 土壤质量含水量 | 0—20  | (8.20±0.05) <sup>Ab</sup>  | (11.02±0.52) <sup>Aa</sup> | (7.88±0.48) <sup>Ab</sup>  | (10.57±2.37) <sup>Aa</sup> | (5.63±1.27) <sup>Ba</sup>  | (9.28±0.31) <sup>Ab</sup>  |
|         | 20—40 | (10.48±0.57) <sup>Aa</sup> | (9.68±3.21) <sup>Aa</sup>  | (8.56±1.18) <sup>Aa</sup>  | (13.04±3.70) <sup>Aa</sup> | (5.78±1.01) <sup>Ba</sup>  | (12.57±1.07) <sup>Aa</sup> |

## 3 讨论

### 3.1 密度调控对林地植物多样性的影响

密度调控影响林隙大小,从而对林下小气候,林下土壤水分及养分,森林更新均有影响<sup>[23]</sup>。本研究中,林分密度降低至 3 m×6 m 时,在各林分中,白榆人工林的林分因子、林下植物多样性的提高表现最为显著(表 2—4)。王玉魁等<sup>[24]</sup>研究发现,随林分密度降低,白榆人工林平均胸径、平均标准木的各部分生物量、林下植物多样性均显著增大;与本研究结果不同的是,蔺鑫等<sup>[25]</sup>研究发现,中密型密度的白榆人工林,其胸径、单株地上生物量、根冠比及林下植物丰富度和多样性均为最大,这是因为盐碱地本身贫瘠与本研究的砂质土壤相比,其林地林分单株生长所能汲取的土壤养分较少,而本研究所属区域,单位面积所拥有的土壤养分相对较多,由于间伐降低了林分种间竞争,利于林分单株生长及林下植物生长所需养分的供给。

本研究中,林分密度降低至 3 m×6 m 时,对旱柳

人工林、白蜡人工林的林分因子、林下植物多样性的提高影响均不显著(表 2—4)。这是因为旱柳人工林在低密度情况下,地表盐分积累较多,盐分胁迫阻碍了林分本身及林下植物的吸水作用,使林分因子和植物的生长均受到限制<sup>[26]</sup>。而白蜡人工林,可能由于生长缓慢的特点,其生长所需的营养空间较小,间伐新增的营养空间对其生长影响不大,所以即使低密度也不会对其林分及林下植物生长产生较大影响。

### 3.2 密度调控对林地土壤物理性质的影响

林分密度改变导致林内环境发生变化,从而影响土壤性质<sup>[27]</sup>。本研究中,林分密度降低至 3 m×6 m 时,各林分同一土层土壤容重比较以及不同土层的土壤容重比较均无显著差异(表 5),这与柳晓娜等<sup>[28]</sup>研究结果不同,这可能由于各林分间伐时间短,林地土壤容重随时间变动缓慢,致使各林地土壤容重无显著变化。

土壤孔隙度直接影响土壤的通气性及渗透性能,孔隙度大的土壤其有机质含量多,土壤结构疏松,有利于地表水下渗,且非毛管孔隙度是决定土壤储水量的

重要因素<sup>[29]</sup>。本研究中,林分密度降低至 3 m×6 m 时,改善了同一土层的土壤孔隙度,表现为毛管孔隙度的增加和非毛管孔隙度的降低(表 6);对于不同土层的土壤孔隙度改良效果表现为白蜡最佳,这与李永涛等<sup>[30]</sup>研究结果相似,主要原因为白蜡人工林根系生物量相对于旱柳和白榆较大,利于土壤毛管孔隙的增加。林分密度降低至 3 m×6 m 时,各林分的 0—20 cm 土层的土壤饱和持水量、毛管持水量及含水量均表现为显著提高(表 7),而各林分中的白榆人工林表现最佳,这可能因为在 3 种林分中,白榆林地表面枯落物覆盖度及厚度相对较大,间伐后加速土壤腐殖质的分解,致使 0—20 cm 土层土壤持水量和含水量相对较多所致;而对于 20—40 cm 土层表现为旱柳人工林的土壤持水量显著提高,这是因为在 20—40 cm 各林分的根系数量表现为旱柳人工林的根系数量最多<sup>[31]</sup>。根系数量的增加提高了土壤的持水能力,而白蜡人工林、白榆人工林在 20—40 cm 土层的根系生物量及根系活力较 0—20 cm 土层差<sup>[32]</sup>,致使其林下土壤持水量降低。

## 4 结论

低林分密度(3 m×6 m)调控,有利于白榆、白蜡、旱柳人工林的林下植物生物量、多样性的增加,且白榆人工林增加的最明显;也有利于林下土壤毛管孔隙度和总孔隙度提高,且白蜡人工林提高的最明显;有利各林分 0—20 cm 土层的土壤饱和持水量和毛管持水量显著提高,且白榆人工林 20—40 cm 土层的土壤质量含水量的提高也达到了显著水平。

### [参 考 文 献]

- [1] 赵杰,樊莉丽,吴明作,等.养殖蚯蚓对黄泛沙质平原杨树人工林土壤及生长的影响[J].中南林业科技大学学报, 2021,41(4):39-46.
- [2] 成向荣,虞木奎,张建锋,等.沿海防护林工程营建技术研究综述[J].世界林业研究,2009,22(1):63-67.
- [3] 盛炜彤.关于我国人工林长期生产力的保持[J].林业科学研究,2018,31(1):1-14.
- [4] 张培,庞圣江,杨保国,等.抚育间伐对江南油杉林分生长的影响[J].西北林学院学报,2020,35(4):84-88.
- [5] 李萌,陈永康,徐浩成,等.不同间伐强度对南亚热带杉木人工林林下植物功能群的影响[J].生态学报,2020,40(14):4985-4993.
- [6] 罗桂生,马履一,贾忠奎,等.油松人工林不同大小林隙环境因子差异性比较[J].中南林业科技大学学报,2020,40(5):86-94.
- [7] 谢锦,闫巧玲,张婷.间伐对日本落叶松人工林林下更新木本植物组成和生长影响的时间效应[J].应用生态学
- [8] Roderick M L, Berry S L. Linking wood density with tree growth and environment: A theoretical analysis based on the motion of water [J]. *New Phytologist*, 2001,149(3):473-485.
- [9] King D A, Davies S J, Supardi M N N, et al. Tree growth is related to light interception and wood density in two mixed dipterocarp forests of Malaysia [J]. *Functional Ecology*, 2005,19(3):445-453.
- [10] Chen Lei, Swenson N G, Ji Niuniu, et al. Differential soil fungus accumulation and density dependence of trees in a subtropical forest [J]. *Science*, 2019, 366(6461):124-128.
- [11] 王凯,那恩航,张日升,等.不同密度下沙地樟子松碳、氮、磷化学计量及养分重吸收特征[J].生态学杂志, 2021,40(2):313-322.
- [12] Ádám R, Ódor P, Bölöni J. The effects of stand characteristics on the understory vegetation in *Quercus petraea* and *Q. cerris* dominated forests [J]. *Community Ecology*, 2013,14(1): 101-109.
- [13] 高孝威,苏和,白艳,等.不同林龄华北落叶松人工林林下植被与土壤理化特性变化特征[J].内蒙古林业科技, 2021,47(2):10-14.
- [14] 王丽娜,吴俊文,董琼,等.抚育间伐对云南松非结构性碳和化学计量特征的影响[J].北京林业大学学报, 2021,43(8):70-82.
- [15] Bastianelli C, Ali A A, Beguin J, et al. Boreal coniferous forest density leads to significant variations in soil physical and geochemical properties [J]. *Biogeosciences*, 2017,14(14):3445-3459.
- [16] 李晓燕,段爱国,张建国,等.不同良种与初植密度杉木林分密度指标动态特征[J].林业科学研究,2021,34(2):72-80.
- [17] 王玲.林分密度对油松人工林群落结构和植物多样性的影响[J].生态环境学报,2020,29(12): 2328-2336.
- [18] 陈贝贝,姜俊,陆元昌,等.间伐强度对马尾松人工林冠下套种种生长的影响[J].北京林业大学学报,2021, 43(1):58-65.
- [19] 侯磊,张硕新,陈云明,等.林分密度对人工油松林下植物的影响[J].西北林学院学报,2013,28(3):46-52.
- [20] 李麟辉,张一平,谭正洪,等.哀牢山亚热带常绿阔叶林与林外草地太阳辐射比较[J].生态学杂志,2011,30(7):1435-1440.
- [21] Zhang Jun, Zhao Yusen, Xin Ying. Changes in and evaluation of surface soil quality in *Populus*×*Xiaohei* shelterbelts in Midwestern Heilongjiang Province, China [J]. *Journal of Forestry Research*, 2021,32(3): 1221-1233.