

晋西黄土丘陵边缘区油松人工林密度调控与生物量特征

宋爱云¹,董林水^{1*},周金星²,张旭东³

(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. 北京林业大学 水土保持学院,水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室,北京 100083;3. 中国林业科学研究院 林业研究所,北京 100091)

摘 要:晋西吕梁山基岩山地与黄土丘陵区生态过渡带的植被和土壤具有明显的过渡性和特殊性。以过渡带内黄土丘陵边缘区的油松人工林为对象,分别研究了油松人工林的合理经营密度、生物量和碳密度特征,并在此基础上分析了油松人工林生态系统的管理对策。应用标准样地调查资料,研究油松树冠面积与胸径的相关关系,并构建出拟合精度高(相关系数 $R=0.875\ 6$)的模型: $Y=0.762\ 4\exp(0.166\ 4\cdot X)$,其中, Y 为树冠面积, X 为径阶。应用上述模型,根据径阶计算理论树冠面积和理论密度,在此基础上考虑树冠重叠度的影响,作为理论密度修正,进而编制了不同郁闭度条件下的油松林分合理密度经营表。研究区域内油松人工林年龄范围在16~37 a,乔木层生物量维持在 $39.97\sim110.93\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$,年均生产力范围在 $1.04\sim3.09\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,乔木层碳密度范围为 $19.99\sim55.47\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$,均低于全国其他气候相对湿润的油松产区。该地区油松人工林多存在初植密度过大的问题,经过几十年的生长,很多林分已经开始出现明显的退化特征,建议该地区应适时进行抚育间伐,间伐标准可参照林分生长现状及林分密度管理表来确定。

关键词:基岩山地;黄土丘陵区;生态过渡带;油松人工林;林分密度;生物量;碳密度

中图分类号:S753 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2016)04-0007-05

Suitable Density Management and Biomass Characters of *Pinus tabulaeformis* Plantations in the Ecotone between Bedrock Region and Loess Hill Area of West Shanxi Province

SONG Ai-yun¹, DONG Lin-shui^{1*}, ZHOU Jin-xing², ZHANG Xu-dong³

(1. Binzhou University, Key Laboratory of Eco-environmental Science for Yellow River Delta, Shandong Province, Binzhou, Shandong 256603, China; 2. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, Beijing 100083, China; 3. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: The vegetations and soils of the ecotone between bedrock region and loess hill area of west Shanxi Province had obvious transitional and unique characteristics. Plantations of *Pinus tabulaeformis* occurring in the ecotone were studied from the aspects of rational management density, biomass, and carbon density. Then the management strategies of the plantations were proposed. Based on the data from the sampling plots of the plantations, the relationship between the crown area and the diameter at breast height (DBH) was analyzed, and the regression model with high fitting accuracy was set up as $Y=0.762\ 4\exp(0.166\ 4\cdot X)$ ($R=0.875\ 6$). The table of theoretical density and suitable management density were established suiting for different canopy densities. The stand ages of *P. tabulaeformis* plantation were 16—37 a in the survey area. The tree layer biomass maintained in $39.97\sim110.93\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$. The average annual productivity ranged from 1.04 to $3.09\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$. The tree layer carbon density ranged from $19.99\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ to $55.47\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$.

收稿日期:2015-09-08 修回日期:2015-11-29

基金项目:国家自然科学基金项目(30671721,30440034);滨州学院博士科研基金项目(2014Y02,2014Y14)。

作者简介:宋爱云,女,博士,研究方向:植物生态学和生态水文功能。E-mail:xueshu210@126.com

* 通信作者:董林水,男,博士,副研究员,研究方向:植物生态学、盐生植物资源利用。E-mail:donglinshui@163.com

hm⁻². The data above mentioned were slightly lower than those of other regions in China with relatively humid climate. The planting density of *P. tabulaeformis* plantations was too high in this area, after decades of growth, many stands began to present obvious degradation characteristics. It was recommended that the stand thinning should be done at least in the ages of 20 to 25-year. The thinning intensity could be based on the stand growth status and stand density management table.

Key words: bedrock area; Loess Hill area; ecotone; *Pinus tabulaeformis* plantation; stand density; bio-mass; carbon density

晋西中阳县属于吕梁山“基岩山地天然次生林区”与沿黄“黄土丘陵农业耕作区”交错分布的特殊景观与地质过渡带,这一地带的植被和土壤母质具有明显的过渡性和特殊性^[1-3]。油松人工林是该区域人工植被恢复的主要造林树种,主要分布在黄土丘陵边缘地区,即黄土丘陵与基岩山地的毗邻地带,而广大的黄土丘陵核心区主要为农业耕作区,人工林分布稀少。目前,黄土丘陵核心区因实行“退耕还林”工程,也营造了一定面积的油松人工林,而针对这些人工林长期经营管理的技术和措施还相对缺乏。针对生态过渡带内的油松人工林进行密度调控研究,可为今后黄土丘陵边缘区和黄土丘陵核心区油松人工林的长期经营管理提供一定的参考依据。研究以晋西中阳基岩山地与黄土丘陵区生态过渡带为研究对象,重点研究黄土地丘陵边缘区人工油松林(*Pinus tabulaeformis*)的密度调控与生物量特征。

1 研究区概况

研究区域位于山西省中阳县典型基岩山地与黄土丘陵区的生态过渡地带,地理中心位置为 37°15' N、111°58'E。该地区属暖温带大陆季风气候,气候干燥,多年平均降水量为 400~500 mm。调查区域土壤主要以黄土丘陵区灰褐土为主,乔木树种主要有油松、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、侧柏(*Platy-*

cladus orientalis)等。

油松为中阳县黄土丘陵区人工造林的优势树种,另外,还有部分的人工刺槐林,在沟谷川地等水分条件较好地段有少量的杨树(*Populus* spp.)、榆树(*Ulmus pumila*)等。其中,榆树、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)、银杏(*Ginkgo biloba*)等在崩顶或阳坡地段也进行了少量人工造林,但因不适应干旱的气候、土壤条件,多数造林失败。经过几十年的生长,该地区很多油松人工林存在密度过大、生长缓慢、林分质量下降等突出问题。

2 研究方法

调查区域为中阳县黄土丘陵区军山林场、下枣林乡、青阳坪以及宁乡镇一带的油松人工林。在海拔 1 300~1 600 m 范围内对油松人工林进行系统调查,选择不同林龄、不同地形条件下的典型油松人工林进行样地调查,每个标准样地为 20 m×20 m。在每个样地内进行每木检尺,共计调查样地 15 个,选择其中 7 个典型样地(表 1),在每个标准地内选取标准木 1~2 株,伐倒实际测量各部分的鲜重,同时取干、皮、枝、叶和根样品,烘干称重测定含水量,换算为干重,计算生物量。进而根据碳-生物量转换系数(0.5)将林分林木生物量转换为碳密度^[4-6]。

表 1 黄土丘陵边缘区油松人工林生长状况

Table 1 Growth status of *P. tabuli formis* plantation in marginal zone of loess hilly region

序号	地形因子	坡度/(°)	林龄组/a	年龄/a	密度/(株·hm ⁻²)	平均胸径/cm	平均树高/m	平均胸径年生长量/(cm·a ⁻¹)
1	崩顶阴坡	15	30~40	37	2 100	10.25	8.52	0.28
2	崩顶半阴坡	16	30~40	36	875	16.39	11.15	0.46
3	半阳坡	18	30~40	32	2 150	8.40	6.70	0.26
4	半阴坡	25	30~40	30	5 000	8.00	7.90	0.27
5	阴坡	23	20~30	24	3 775	7.91	7.40	0.33
6	崩顶阳坡	17	10~20	19	6 378	5.78	4.65	0.30
7	崩顶半阴坡	12	10~20	16	2 250	8.40	5.64	0.53

本研究对该地区现有油松人工林进行详细的外业调查,标准地设置中考虑到不同林龄、地形、密度、立地条件,共计调查 20 m×20 m 样地 15 个,去除每个样地内林下小径阶被压木和上层少数“霸王

木”,以提高方程的拟合精度,选择该地区不同林分样地内油松共计 1 325 株。根据标准地平均胸径与平均树冠面积进行相关关系分析,用方程进行拟合。根据径阶计算理论树冠面积和理论密度。同时,考

虑树冠重叠度的影响,作为理论密度修正,依据郁密度的不同,制定密度经营表^[7]。

表 1 中列出了晋西中阳黄土丘陵边缘区不同林龄组(16~37 a)典型油松人工林的生长情况,从表中可以看出,该地区油松林平均胸径年生长量为 0.26~0.53 cm·a⁻¹,其中,水分条件较差地段多在 0.33 cm·a⁻¹ 以下,部分立地条件较好地段可达到较高的胸径年生长量。

3 结果与分析

3.1 油松人工林适宜栽培密度调控

黄土高原地区油松人工林适宜密度的确定,有学者从水分亏缺量的研究角度,通过植物生长的水分需求量来确定理论林分密度^[8-9]。本研究根据实地调查研究结果,建立树冠面积与胸径的拟合模型,并考虑树冠重叠度的因素进行修正,最终确定不同林分径阶条件下的林分合理经营管理密度^[10-12]。

山西省部分地区曾经编制油松人工林经营密度表,比如包括晋东南地区、中条山林区等地。但是,关于晋西基岩山地与黄土丘陵区生态过渡带的油松人工林经营密度,没有单独进行研究和分析。该地区的植被和土壤生态环境均具有“过渡性”特征,这一特殊地区油松人工林生长情况如何,非常值得研究。因而,本研究以晋西中阳黄土丘陵区油松人工林为研究

对象,进行了油松适宜栽培密度的调查研究。

林分理论密度为假设树冠之间既不重叠,也不出现空隙时单位面积上的立木株数,要求林分中每株林木都有一个适宜的生长空间。根据林分密度与胸径、胸径与树冠垂直投影面积的相关规律来推算不同平均直径林分的密度指标是一种常用的方法^[13-17]。如表 2 所示,根据上述方程计算理论树冠面积的基础上,进一步计算油松人工林的理论密度。

本研究选择黄土丘陵边缘区不同林分样地内油松共计 1 325 株,进行树冠面积和径阶的关系方程拟合。根据两者在 Excel 软件中的散点分布趋势图,采用多种方程进行自动拟合,备选方程包括: $Y=0.658\ 2X-1.315\ 4$; $Y=0.762\ 4\exp(0.166\ 4 * X)$; $Y=6.164\ 6\ln(X)-8.520\ 7$ (Y 为树冠面积, X 为径阶)。选择其中拟合精度最高(相关系数 $R=0.875\ 6$)的方程: $Y=0.762\ 4\exp(0.166\ 4 * X)$,并根据此方程计算各径阶的理论树冠面积(表 2)。

在标准地调查中发现,树冠重叠现象普遍存在,以前的研究也已经注意到这个问题,即使在较小郁闭度(0.4)情况下,也有重叠现象发生。其重叠程度随林分郁闭度增加而增大,在高郁闭度情况下甚至出现多层重叠。因此,编制密度表需要考虑重叠度因素,选用山西省制定的重叠度与郁闭度的关系^[7]如表 3。

表 2 理论树冠面积与林分密度

Table 2 The theoretical crown area and stand density												
径级/cm	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
理论树冠面积/m ²	1.48	1.75	2.06	2.44	2.88	3.40	4.02	4.75	5.61	6.63	7.83	9.25
理论密度/(株·hm ⁻²)	6 741	5 708	4 833	4 092	3 465	2 934	2 484	2 103	1 781	1 508	1 277	1 081

表 3 油松人工林树冠重叠度与郁闭度的关系^[7]

Table 3 The relationship between crown overlapped percentage and canopy density of <i>P. tabulaeformis</i> plantation							
郁闭度	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
重叠度/(%,理论值)	2.99	7.94	15.22	24.23	34.34	45.03	55.94

油松人工林合理经营密度表是以理论密度为依据,再应用相应郁闭度下树冠重叠度修正而计算得到。经营密度的计算公式: $N_{\text{经}}=N_{\text{理}}\times P\times(1+C)$;其中, $N_{\text{经}}$ 为经营密度, $N_{\text{理}}$ 为理论密度, P 为郁闭度, C 为重叠度。

考虑到下层抚育将导致林分间伐后平均直径非生长性增加,经营密度也会相应减少。一般中等强度的间伐,伐后平均直径提高 0.5 cm 左右。因此,将各径阶加上 0.5 cm 直径代入上式,分别求出各相应的经营密度数值,作为经营密度的下限更为合适。具体计算得到的油松人工林合理经营密度如表 4

所示。

综合前述油松人工林的生长状况和林分合理经营密度研究可知,当油松人工林的林分密度过大时,在 20~25 年生时,已明显影响林分平均胸径和树高的生长速度,进而影响林分产量和整体质量。林分密度是影响黄土丘陵边缘区油松林林分质量和年均生产力的关键因素,在造林初植密度一般都会偏大的前提下,随着林分的生长应适时进行间伐,建议至少在 20~25 年生时,进行一次抚育间伐,抚育间伐强度可参照表 4 提供的合理经营密度和林分的生长现状来确定。

表 4 油松人工林经营密度

Table 4 The rational management density of *P. tabulaeformis* plantations at different diameter grades (株·hm⁻²)

径级	郁闭度	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
5	上限	8 562	7 449	6 119	4 955	3 939	3 079
	下限	7 878	6 854	5 630	4 559	3 624	2 834
6	上限	7 250	6 307	5 181	4 195	3 335	2 607
	下限	6 671	5 804	4 767	3 860	3 069	2 399
7	上限	6 138	5 340	4 387	3 552	2 824	2 208
	下限	5 648	4 914	4 037	3 268	2 598	2 031
8	上限	5 197	4 522	3 714	3 007	2 391	1 869
	下限	4 782	4 161	3 418	2 767	2 200	1 720
9	上限	4 401	3 828	3 145	2 546	2 024	1 583
	下限	4 049	3 523	2 894	2 343	1 863	1 456
10	上限	3 726	3 242	2 663	2 156	1 714	1 340
	下限	3 429	2 983	2 450	1 984	1 577	1 233
11	上限	3 155	2 745	2 255	1 826	1 451	1 135
	下限	2 903	2 526	2 075	1 680	1 335	1 044
12	上限	2 671	2 324	1 909	1 546	1 229	961
	下限	2 458	2 138	1 757	1 422	1 131	884
13	上限	2 262	1 968	1 616	1 309	1 040	813
	下限	2 081	1 811	1 487	1 204	957	749
14	上限	1 915	1 666	1 369	1 108	881	689
	下限	1 762	1 533	1 259	1 020	811	634
15	上限	1 621	1 411	1 159	938	746	583
	下限	1 492	1 298	1 066	863	686	537
16	上限	1 373	1 194	981	794	632	494
	下限	1 263	1 099	903	731	581	454

3.2 油松人工林生物量和碳密度

3.2.1 油松人工林密度对生物量和碳密度的影响

表 5 中列出本地区典型的油松人工林乔木层生物量及碳密度,由表 5 可知,不同年龄和立地条件下的油松林生物量存在较大差异。人工油松林年龄范围在 16~37 a。从生物量来看,人工油松林乔木层生物量维持在 39.97~110.93 t·hm⁻²,年均生产力范围在 1.04~3.09 t·hm⁻²,乔木层碳密度范围为 19.99~55.47 t·hm⁻²。由表 1 和表 5 可知,较高密度的油松人工林在短时间内可以起到提高林分物

量和生产力的作用,但长期来讲,不利于林分质量和生产力的维持。

3.2.2 本地区与其他地区油松人工林生物量比较

吴刚^[18]等对中国不同地区油松人工林生物量进行了对比,具体如图 1 所示,结果表明,30 年生左右郁闭油松林乔木层生物量维持在 71.77~117.39 t·hm⁻²范围内,年均生产力范围在 2.39~3.91 t·hm⁻²,其中暖温带南部、暖温带东部和亚热带等相对湿润地区的油松人工林生物量和年均生产力要明显大于暖温带北部半湿润地区。

表 5 油松人工林乔木层生物量与碳密度

Table 5 The tree layer biomass and carbon density of *P. tabulaeformis* stand at different ages

样地号	年龄/a	林分密度 /(株·hm ⁻²)	生物量 /(t·hm ⁻²)	年均生产力 /(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	乔木层碳密度 /(t·hm ⁻²)
1	37	2 100	110.93	2.57	55.47
2	36	875	75.60	1.70	37.80
3	32	2 150	39.97	1.04	19.99
4	30	5 000	101.77	2.83	50.89
5	24	3 775	65.38	2.27	32.69
6	19	6 378	58.74	3.09	29.37
7	16	2 250	46.91	2.44	23.46

对中国主要油松分布区内的林分生物量进行的研究表明^[10],山西省的油松林生物量维持在 45.75~125.46 t·hm⁻²范围内,其中,幼龄林即 15 年生油松林,林分密度为 7 246 株·hm⁻²时,生物量为 45.75 t·hm⁻²,而当林龄为 35 年生时,林分生物量

最大为 125.46 t·hm⁻²,当林龄为 25~55 年生时,群落生物量多维持在 79.76~89.18 t·hm⁻²。对比表 5 可知,该研究得出的油松林生物量要略高于本研究地区的油松林生物量。

从调查结果来看,晋西中阳黄土丘陵区油松人

工林林分生物量多低于我国东部和南部湿润地区,但是,在水分条件相对较好地段,当林龄到达35 a左右时,林分乔木层生物量可以达到75.60~110.93 t·hm⁻²,可以形成相对较高的生物产量。另外,密植条件下,可以显著提高林分生物量,但是,同时也造成林分单株生物量过低,林分过度郁闭,树木个体之间竞争作用强烈,枝下高过高,林分质量下降,不利于林分的可持续经营。因此,该地区人工林分在生长初期的幼龄林阶段,可以采取适当密植的方法,但是当林分到达一定年龄后,林分过度郁闭应及时进行抚育间伐^[19-20]。

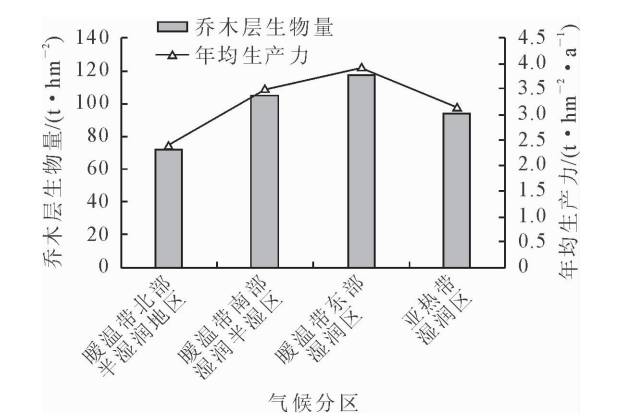


图1 不同气候区油松林生物量及年均生产力
(根据现有资料绘制^[18])

Fig. 1 The tree layer biomass and average annual productivity of *P. tabulaeformis* stand at different climate regions

4 结论与讨论

晋西吕梁山基岩山地与黄土丘陵区生态过渡带的植被和土壤具有明显的过渡性和特殊性。该生态过渡带内黄土丘陵边缘区植被恢复和建设主要以人工造林为主,油松是该地区人工造林的核心树种。研究该地区油松人工林的密度调控具有重要意义,另外,对于广大黄土丘陵核心区“退耕还林”而营造的人工林管理也具有借鉴价值。

本研究应用油松人工林标准地调查资料进行胸径和树冠面积模型拟合,并构建出最优拟合方程,在此基础上考虑树冠重叠度的影响,作为理论密度修正,最终根据胸径、树冠面积和林分密度之间的相关关系,编制出该地区的油松人工林合理密度表,依据该表可以确定林分抚育间伐的时间和强度。

该地区油松人工林多存在初植密度过大的问题,经过几十年的生长,很多林分已经开始出现明显的退化特征。建议该地区适时进行抚育间伐,间伐标准可参照林分生长现状及林分密度管理表来确定。

研究区域内油松人工林年龄范围在16~37 a,

乔木层生物量维持在39.97~110.93 t·hm⁻²,年均生产力范围在1.04~3.09 t·hm⁻²·a⁻¹,乔木层碳密度范围为19.99~55.47 t·hm⁻²,均低于全国其他气候相对湿润的油松产区。杨玉姣^[21]等对黄土高原子午岭林区的油松人工林研究表明,23、33、47年生油松人工林乔木层生物量分别为54.46、114.19、134.00 t·hm⁻²;而对应的乔木层碳密度依次为26.56、59.73、60.20 t·hm⁻²,可见子午岭林区油松人工林生长速度要明显高于本研究区域。

综上所述,通过对晋西黄土丘陵边缘区油松人工林密度调控、生物量和碳密度的研究表明,只有合理地调控林分的经营密度,才能在保证林分较高生产力的同时,维持树木个体的健康和林分的整体质量,实现油松人工林的可持续经营,进而保证更好的生态经济效益。

参考文献:

[1] 王晓慧,陈永富,陈尔学. 近30年三北防护林工程中阳县土壤侵蚀变化分析[J]. 西北林学院学报,2012,27(5):1-5.
WANG X H, CHEN Y F, CHEN E X. Change analyses of soil erosion in 30 years in Zhongyang County, regions of Three-North shelter forest project[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(5): 1-5. (in Chinese)

[2] 董林水,张旭东,周金星. 晋西黄土丘陵区与土石山区交错地带植物区系特征分析[J]. 干旱区资源与环境,2007(8):157-162.
DONG L S, ZHANG X D, ZHOU J X. The characteristics of flora of seed plants in the ecotone between the bedrock area and loess area of western Shanxi Province[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007(8): 157-162. (in Chinese)

[3] 董林水. 晋西基岩山地与黄土丘陵区生态过渡带植被特征及生态恢复机理研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2005.

[4] 莎仁图雅,段玉玺,武佳琪. 内蒙古大青山不同林分密度油松人工林碳密度研究[J]. 内蒙古林业科技,2013,39(3):13-16.

[5] 程小琴,韩海荣,康峰峰. 山西油松人工林生态系统生物量、碳积累及其分布[J]. 生态学杂志,2012,31(10):2455-2460.
CHENG X Q, HAN H R, KANG F F. Biomass, carbon accumulation and its partitioning of a *Pinus tabulaeformis* plantation ecosystem in Shanxi Province, China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(10): 2455-2460. (in Chinese)

[6] 曹旭平,申家朋,张文辉,等. 陇东地区油松人工林碳密度及其影响因素[J]. 水土保持通报,2015,35(3):359-364.
CAO X P, SHEN J P, ZHANG W H, et al. Carbon density and its influence factors of *Pinus tabulaeformis* plantation in Longdong area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(3): 359-364. (in Chinese)

[7] 山西省林业科学研究所. 山西省林业科学研究所科研文集[M]. 北京:学术书刊出版社,1989.

[8] 张建军,贺维,纳磊. 黄土区刺槐和油松水土保持林合理密度的研究[J]. 中国水土保持科学,2007,5(2):55-59.

[15] 汪有良,王保松,施士争.灌木型柳树镉吸收积累性状的研究[J].西北林学院学报,2011,26(2):105-110.
WANG Y L,WANG B S,SHI S Z. Cadmium absorption characters of bush willow [J]. Journal of Northwest Forestry University,2011,26(2):105-110. (in Chinese)

[16] 张春燕,王瑞刚,范稚莲,等.杨树和柳树富集 Cd、Zn、Pb 的品种差异性[J].农业环境科学学报,2013,32(3):530-538.
ZHANG C Y,WANG R G,FAN Z L,*et al.* Difference in cadmium,zinc and lead accumulation of poplar and willow species [J]. Journal of Agricultural Environmental Science,2013,32(3):530-538. (in Chinese)

[17] KOWALIK P J,RANDERSON P F. Nitrogen and phosphorus removal by willow stands irrigated with municipal waste water—a review of the Polish experience [J]. Biomass and Bioenergy,1994,6(1-2):133-139.

[18] GAINER A E,DYCK M F,KACHANOSKI G. Characterization of nutrient transport below the root zone of a willow plantation irrigated with municipal waste water in the Boreal Parkland transition zone,Alberta,Canada [C]. American Geophysical Union Fall Meeting,2010,1:1040.

[19] DIMITRIOU J,ARONSSON P. Nitrogen leaching from short-rotation willow coppice after intensive irrigation with wastewater [J]. Biomass and Bioenergy,2004,26(5):433-441.

[20] BRIX H. Danish guidelines for small-scale constructed wet-land systems for onsite treatment of domestic sewage [J]. Water Science & Technology,2005,51(9):1-9.

[21] 林惠凤,黄婧,朱联东,等.浮床栽培柳树在富营养化水体中的生长特性及水质净化效果研究[J].湖北大学学报:自然科学版,2009,31(2):210-212.

[22] 赵珊,张军,陈沉,等.木本植物作为人工湿地植物的可行性试验[J].净水技术,2012,31(1):73-79.

[23] 王瑛,张建锋,陈光才.柳树对水体氮素的去除率及其吸收动力学[J].生态学杂志,2012,31(9):2305-2311.

[24] GB 3838-2002,中华人民共和国地表水环境质量标准[S].北京:中国环境科学出版社,2002.

[25] GB 18918-2002,城镇生活污水处理厂污染物排放标准[S].北京:中国环境科学出版社,2002.

[26] 楚伟伟.波形潜流人工湿地处理模拟生活污水的研究[D].郑州:郑州大学,2010.

[27] 沈善敏,宇万太,张璐,等.杨树主要营养元素内循环及外循环研究Ⅰ:落叶前后各部位养分浓度及养分贮量变化[J].应用生态学报,1992,3(4):296-301.

[28] 沈善敏,宇万太,张璐,等.杨树主要营养元素内循环及外循环研究Ⅱ:落叶前后养分在植株体内外的迁移和循环[J].应用生态学报,1993,4(1):27-31.

(上接第 11 页)

[9] 孙鹏森,马李一,马履一.油松、刺槐林潜在耗水量的预测及其与造林密度的关系[J].北京林业大学学报,2001,23(2):1-6.
SUN P S,MA L Y,MA L Y. Potential water use extrapolation and planting density calculation of Chinese pine and black locust stands in north Beijing mountain area[J]. Journal of Beijing Forestry University,2001,23(2):1-6. (in Chinese)

[10] 徐化成.油松[M].北京:中国林业出版社,1993.

[11] 赵赫然,王辉,段雅楠.华家岭防护林带不同树种生长特征分析[J].干旱区资源与环境,2015,29(1):48-52.

[12] 吴钦孝,杨文治.黄土高原植被建设与持续发展[M].北京:科学出版社,1998.

[13] 卢昌泰,李吉跃,康强,等.马尾松胸径与根径和冠径的关系研究[J].北京林业大学学报,2008,30(1):58-63.
LU C T,LI J Y,KANG Q, *et al.* Relationship between DBH and ground diameter as well as crown diameter of *Pinus massoniana* [J]. Journal of Beijing Forestry University,2008,30(1):58-63. (in Chinese)

[14] 沈国舫.森林培育学[M].北京:中国林业出版社,2001.

[15] 张丽楠,王得祥,郝亚中,等.陕西宁东林业局华北落叶松人工林最适经营密度研究[J].西北林学院学报,2013,28(1):146-150.
ZHANG L N,WANG D X,HAO Y Z,*et al.* Optimal management density of *Larix principis-rupprechtii* plantations of Ningdong forestry bureau in Shaanxi Province[J]. Journal of Northwest Forestry University,2013,28(1):146-150. (in Chinese)

[16] 田猛,曾伟生,孟京辉,等.福建杉木人工林密度控制图研制及应用[J].西北林学院学报,2015,30(3):157-163.
TIAN M,ZENG W S,MENG J H,*et al.* Development and application of density management diagram for *Cunninghamia lanceolata* plantation in Fujian[J]. Journal of Northwest Forestry University,2015,30(3):157-163. (in Chinese)

[17] 顾丽,王新杰,龚直文,等.落叶松人工林根径材积表和合理经营密度研究[J].西北林学院学报,2009,24(5):180-185.
GU L,WANG X J,GONG Z W,*et al.* Ground diameter volume table and reasonable density management of *Larix gmelinii* stand [J]. Journal of Northwest Forestry University,2009,24(5):180-185. (in Chinese)

[18] 吴刚,冯宗炜.中国油松林群落特征及生物量的研究[J].生态学报,1994,14(4):415-422.
WU G,FENG Z W. Study on the social characteristics and biomass of the *Pinus tabulaeformis* forest systems in China [J]. Acta Ecologica Sinica,1994,14(4):415-422. (in Chinese)

[19] 尤健健,张文辉,邓磊.油松中龄林间伐的密度效应[J].西北林学院学报,2015,30(1):172-177.
YOU J J,ZHANG W H,DENG L. Intermediate cutting density effects on middle-aged *Pinus tabulaeformis* plantation [J]. Journal of Northwest Forestry University,2015,30(1):172-177. (in Chinese)

[20] 张彦雷,康峰峰,韩海荣,等.太岳山油松人工林冠下光环境特征与冠层结构[J].南京林业大学学报:自然科学版,2014,38(2):169-174.

[21] 杨玉姣,陈云明,曹扬.黄土丘陵区油松人工林生态系统碳密度及其分配[J].生态学报,2014,34(8):2128-2136.