

内蒙古兴和县低山丘陵立地类型划分与林草适宜性评价

赖文豪¹, 席沁¹, 武海龙², 崔友源¹, 赵廷宁¹

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2. 兴和县林业局, 内蒙古 兴和 013650)

摘要: 为了解半干旱区宜林荒山合理利用方式, 于2016年7月和8月对兴和县低山丘陵造林地进行立地类型划分与林草适宜性评价。通过对38个样地的油松 *Pinus tabulaeformis* 树高和草本植物地上部分生物量进行多元线性回归分析, 结果表明: 影响油松生长的主导因子包括土壤厚度和平均土壤含水率, 影响草本生物量的主导因子包括表土含水率、表土全氮质量分数、表土全磷质量分数和土壤砾石含量。通过单因素方差分析, 选取和验证了地貌、地形、坡向、土壤质地、土层厚度、砾石含量作为立地划分因子, 最终将研究区荒山荒坡造林地划分出8种立地类型。林草适宜性评价结果表明: 第1级的立地同时适宜油松和草本植物的生长; 第2级的立地较适宜油松生长, 但不适宜草本植物生长; 第3级的立地较为适宜草本植物生长, 油松生长状况略差; 第4级的立地不适宜油松生长, 但草本植物生长稍好。根据各立地类型情况提出相应的林草措施建议。图1表6参35

关键词: 森林培育学; 水土保持林; 半干旱区; 栗钙土; 低山丘陵; 立地划分; 适宜性评价

中图分类号: S727.22

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2018)02-0331-09

Site classification type and vegetation suitability evaluation for hilly land in Xinghe, Inner Mongolia

LAI Wenhao¹, XI Qin¹, WU Hailong², CUI Youyuan¹, ZHAO Tingning¹

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Forest Enterprise of Xinghe County, Xinghe 013650, Inner Mongolia, China)

Abstract: For rational forestry use of barren hills in a semi-arid area, site classification and a vegetation suitability evaluation were conducted for afforestation on hilly land in July and August 2016 in Xinghe, Inner Mongolia. Three soil profiles were set to investigate soil moisture, physical and chemical properties in each plot, also the average height of young *Pinus tabulaeformis* and average aboveground biomass of three herbaceous quadrat were investigated in 38 plots with the size 10 m × 20 m. Results concerning relationship between vegetation growth and site conditions showed that the main factors significantly affecting *P. tabulaeformis* included soil thickness and average soil moisture content ($P < 0.05$); whereas, those significantly affecting herbaceous biomass included surface soil moisture content, surface total nitrogen content, surface total phosphorus content, and gravel content ($P < 0.05$). Based on the single factor analysis, topography, landform, slope aspect, soil texture, soil thickness, and gravel content could make effect on soil moisture or total phosphorus content ($P < 0.05$), and therefore these were selected as factors for site classification type with eight site types defined for afforestation in hilly land. In vegetation suitability evaluation, eight site types were divided into four ranks based on their vegetation growth. Sites in the 1st class were both suitable for *P. tabulaeformis* saplings and herbaceous plants. Sites in the 2nd class were suitable for *P. tabulaeformis* but not for herbaceous plants. Sites in the 3rd class were suitable for herbaceous plants, while *P. tabulaeformis* had a normal growth. Sites in the 4th class were not suitable for *P. tabulaeformis*, although the herbaceous plants grew well. In order to take full

收稿日期: 2017-02-28; 修回日期: 2017-04-07

基金项目: 本田在华关联企业委托科研项目(2015HXFWBSBX014)

作者简介: 赖文豪, 从事工程绿化等研究。E-mail: laiwenh@126.com。通信作者: 赵廷宁, 教授, 博士生导师, 从事水土保持、工程绿化、植被恢复等研究。E-mail: zhtning@bjfu.edu.cn

advantage of barren hills, sites in 1st and 2nd class were suggested to be forest land. Sites in the 3rd class could be planned as mixed forest of arbor and shrub, and sites in 4th class could be planned as grassland. [Ch, 1 fig. 6 tab. 35 ref.]

Key words: silviculture; soil and water forest; semi-arid area; chestnut soil; hilly land; site classification; suitability evaluation

合理划分造林地的立地类型,是实现因地制宜、适地适树的必要前提^[1],针对立地类型划分与评价问题,研究者采用了不同的方法。一些学者利用树木生长模型和立地指数进行立地划分和评价^[2-6],此方法多用于林业生产中的同龄纯林林地,能够直观且精确地反映林木对立地的适应状况并预测林木生长状况,但不能反映立地之间林木长势差异的原因^[7]。一些学者则直接以地形和土壤作为立地划分的依据,或者通过数量化理论^[8-9]、判别分析^[10-11]、主成分分析^[12-13]、多元回归分析^[14-18]等筛选影响林木生长的主导因子并进行划分。此外,自然条件恶劣的造林地,还可以利用影响植物生长的限制因素如风沙危害、盐害程度、地表岩石裸露状况^[19-20]等进行立地划分。目前,国内在大尺度森林立地划分的研究取得了较多的成果,如李世东^[21]对退耕还林区的立地分类,张万儒^[22]和詹昭宁^[23]对全国森林立地的划分等。但这些成果应用在小尺度区域时,其划分的细致程度还不能完全满足实际造林工作的规划与设计需求,因此更为细致的立地划分研究仍有必要。不仅如此,半干旱地区较为恶劣的气候环境,要求该地区的生态建设工作需要兼顾林地与草地的规划,但以往立地分类研究通常只考虑到乔木树种的适宜性,目前综合评价立地林木和草本适宜性的研究成果较少。内蒙古乌兰察布市兴和县地处生态脆弱的农牧交错带,当地采取退耕还林、恢复林草植被的措施,以改善生态环境、控制风沙源。但兴和县处于黄土高原边缘和阴山山脉的过渡地带,地貌变化导致土壤状况差异明显,造林地未选择合适的造林树种将最终导致树木生长受到限制,林分生产力低下^[24]。本研究在立地类型划分的基础上,对各立地类型的林木和草本植物适宜性进行评价,并提出相应的林草措施建议,以期对周边相似地区的生态恢复提供指导。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区南部,地处晋、蒙、冀三省交界处(40°26'~41°27'N, 113°21'~114°07'E),气候类型属中温带半干旱大陆性季风气候区,年平均气温为4.2℃,1月平均气温为-13.8℃,7月平均气温为19.9℃,无霜期为95~130 d,≥10℃积温为2 300~2 400℃,年均日照总时数为3 100 h。年平均降水量为380 mm,主要集中在6-9月。研究区以友谊水库南岸为界向西南延伸8 km,地貌由土石山地逐渐变为黄土丘陵,能够反映兴和县境内山地向丘陵过渡的特征。研究区海拔最低处为1 191 m,最高处为1 310 m。根据《中国森林立地类型》的划分^[22],兴和县属于黄土高原暖温带立地区域,黄土丘陵立地区,晋蒙黄土丘陵立地类型亚区,土壤以栗钙土为主。

2008年初,本田在华关联企业兴和县林业局在友谊水库南岸的荒山荒坡及退耕地开展公益造林,造林树种包括油松 *Pinus tabulaeformis*, 樟子松 *Pinus sylvestris* var. *mongolica*, 小叶杨 *Populus simonii*, 火炬树 *Rhus typhina*, 山杏 *Armeniaca sibirica*, 柠条 *Caragana korshinskii*, 沙棘 *Hippophae rhamnoides* 等。造林季节选择在春季,造林整地于前一年秋季进行,土石山地造林地土层较厚处采用规格为1.5 m × 0.8 m × 0.6 m 的鱼鳞坑整地;土层较薄、坡度较大的造林地则采用0.8 m × 0.6 m × 0.5 m 的鱼鳞坑;山脚平缓地带和黄土丘陵造林地采用规格2.5 m × 0.8 m × 0.6 m 的大坑整地。栽植后当年浇水3次,第2年和第3年每年浇水2次。造林所用油松皆为苗高大于30 cm 的容器苗,造林密度为1 667 株·hm⁻²,本研究选择栽植数目最多、面积范围最广的油松作为调查树种。目前所有林分属于幼龄林,但立地条件差异对林木生长的影响已初步显现;同时油松幼林尚未郁闭,整地坑穴外的草本植物并未因遮蔽而影响生长,因此可以同时评价立地的林木和草本适宜性。

1.2 调查点布设与样品采集

于2016年7-8月,采用典型样地法选取了38个油松林样地作为调查对象,样地规格为10 m × 20 m,测量样地内所有油松树高。由于不同年份所选择的造林地立地条件差异较大,因此本研究通过测

量油松轮生枝的方法推算同一年龄树高^[25-26]。田国恒等^[27]在冀北山地对油松生长规律的研究表明，油松在 5~26 a 处于树高生长旺盛阶段。因此，本研究选定油松栽植后第 5 年的树高进行分析。样地内沿对角线方向设置 3 个 1 m × 1 m 的草本样方，将草本植物地上部分全部采集。因研究区内天然灌木植被极为稀疏，故不设置灌木调查样方。同时在鱼鳞坑或树穴之间挖 3 个剖面，每个剖面以 20 cm 分层用环刀和铝盒取样。同时再取一定量土壤样本用于土壤化学性质分析，取样深度至 60 cm 或母质为止，将相同取样深度的土壤样品混合。

1.3 样品处理

将采集的草本植物烘干测定样方内草本植物的生物量(干质量)。土壤含水量通过烘干法测定，土壤容重和田间持水量通过环刀法测定。用于土壤化学分析的样品采集后进行风干处理，利用筛分法和简易比重计法测定土壤机械组成，用 MP522 型精密 pH/电导率(上海三信仪表厂)测定土壤 pH 值，用重铬酸钾容量法(稀释热法)测定有机碳，用湿烧法测定土壤全氮，用高氯酸(HClO₄)-硫酸(H₂SO₄)法测定土壤全磷，用火焰光度法测定全钾^[28]。

1.4 立地划分与评价

通过对土壤物理性质、化学性质、光照状况与植物生长状况进行回归分析，探究各指标对植物生长显著性。因研究区相对集中，属于同一立地类型区，研究区海拔最高处与最低处之差不足 150 m，故不再将海拔、降水量作为立地划分的依据；太阳辐射量参考许宗文等^[29]关于太阳直接辐射与地形关系的研究，根据样地坡向和坡度推算太阳直接辐射量。根据回归分析结果，挑选出可能对造林树种生长状况产生影响的地形地貌因子和土壤因子作为立地划分的依据，并采用单因素方差分析进行验证。根据立地划分因子和植物生长状况，采用聚类分析对造林地进行立地类型划分。在此基础上，统计不同立地类型油松第 5 年树高和草本植物地上部分生物量，进行立地林草适宜性评价并提出相应的规划建议。

1.5 数据处理

数据均使用 Excel 2016 和 SPSS 22 等软件处理。对土壤理化性质、光照状况与植物生长状况进行了多元回归分析；对各立地划分因子与植物生长主导因子进行了单因素方差分析；并以立地划分因子和植物生长指标为依据，对 38 个样地利用聚类分析进行立地划分。

2 结果与分析

2.1 影响植物生长的主导因子

为探究土壤及光照对植物生长状况的影响，采用回归分析法，找出具有显著性影响的指标。挑选的指标包括：土层厚度(x_1)，土壤容重(x_2)，田间持水量(x_3)，土壤砾石含量(x_4)，平均土壤含水率(x_5)，平均 pH 值(x_6)，平均有机碳质量分数(x_7)，平均全氮质量分数(x_8)，平均全磷质量分数(x_9)，平均全钾质量分数(x_{10})，表土含水率(x_{11})，表土 pH 值(x_{12})，表土有机碳质量分数(x_{13})，表土全氮质量分数(x_{14})，表土全磷质量分数(x_{15})，表土全钾质量分数(x_{16})，太阳直接辐射量(x_{17})。

用各项指标分别对油松第 5 年树高(y_1)和草本植物地上部分生物量平均值(y_2)进行一元回归分析，其中与 y_1 具有显著回归关系的指标有(按复相关系数 R 高低排序)： $x_1(0.725)$ ， $x_5(0.697)$ ， $x_2(0.535)$ ， $x_{11}(0.531)$ ， $x_3(0.530)$ ， $x_8(0.437)$ ， $x_{14}(0.372)$ 。与 y_2 具有显著回归关系的指标有： $x_{11}(0.502)$ ， $x_5(0.435)$ ， $x_4(0.423)$ ， $x_2(0.389)$ ， $x_{14}(0.363)$ 。一元回归分析结果表明： y_1 受到土壤厚度影响最为显著，土壤水分状况对 y_1 和 y_2 也具有显著的影响，其他土壤物理性质和化学性质都有一定的影响。相比之下，太阳直接辐射量与植被生长状况关系并不显著。由于各指标之间存在相互影响，部分指标只是间接对植物生长产生了影响。因此采用多元回归分析的方法，将可以被其他指标替代的部分进行剔除。用各项指标对 y_1 和 y_2 进行逐步回归分析，结果为：

$$y_1=0.654x_1+205.347x_5+45.963(R^2=0.632);$$

$$y_2=111.925x_4+342.695x_1-73.873x_{14}+112.623x_{15}+40.432(R^2=0.558)。$$

多元回归分析表明：影响油松生长的主导因子为土壤厚度和平均土壤含水率。土壤厚度决定了油松根系生长空间和所需要的水分与养分的容量，整个剖面的平均土壤含水量也显著影响油松的生长。土壤容重和田间持水量是影响土壤含水量的部分因素，砾石含量和养分含量受土壤厚度影响，因此在多元回

归分析中不显著。

影响草本生物量的主导因子包括表土含水率、表土全氮质量分数、表土全磷质量分数和土壤砾石含量的影响,其中最为关键的是表土含水率,砾石含量与养分含量分居其后。研究区春季风沙活动频繁,草本植物返青之前土壤表层砾石含量的增加可减少风力对沙土的侵蚀量,这有利于保存土壤中的植物种子,因此砾石含量对草本生物量有显著影响。但在土层浅薄、地表有岩石裸露的样地,虽然土壤细粒部分的全氮含量明显高于其他样地,砾石含量过高使得土壤养分总量减少,实际可供植物吸收的氮素却减少了,因此土壤全氮质量分数与生物量呈负相关;土壤全磷质量分数受土层厚度等因素干扰较小,作为养分指标与生物量呈正相关。

2.2 立地划分因子

水分含量与养分含量是植物生长的关键因素,但难以通过现场调查的方式直接测得。这些指标通常会受到地形地貌特征和土壤特征的影响,而地形地貌特征和土壤特征又具有稳定直观、易于调查和测量的特点,在许多研究中常被用作立地划分因子。因此,在前人研究的基础上^[30],选取地貌、地形、坡向、土壤质地、土层厚度、砾石含量作为立地划分因子。将立地划分因子进行数量化处理(表1),并与 x_5 , x_{11} , x_{14} , x_{15} 进行单因素方差分析,以验证各立地划分因子是否对土壤水分状况和养分状况造成显著性差异。

表1 立地因子量化

Table 1 Quantification of site factors

地貌	地形/(°)	坡向	土壤质地	土层厚度/cm	砾石含量/%
土石山地	0~5	无明显坡向	壤质砂土	0~20	≤10
黄土丘陵	5~15	阳坡半阳坡	轻砾石土	20~40	>10~30
	15~25	阴坡半阴坡	砂质黏土	>40	>30

从表2可见:地貌、地形、坡向、土壤质地、土壤厚度的差异对土壤平均含水量(x_5)产生了显著性影响,地貌、地形、坡向对表土含水量(x_{11})具有显著性影响。而土壤养分方面,只有地貌、土壤质地、土壤厚度、砾石含量对表土全氮质量分数(x_{14})有显著性影响,而表土全磷质量分数(x_{15})并未受到其他因素的显著影响。虽然砾石含量对土壤水分和表土全磷质量分数影响较小,但对草本植物的生物量却具有显著影响,因此,仍将它用于立地类型划分。综上所述,各因子可以用于立地类型划分。

表2 立地划分因子对土壤水分与养分影响的显著性检验结果

Table 2 Signification of site-factor effects on soil moisture and nutrient

指标	地貌	地形	坡向	土壤质地	土层厚度	砾石含量
x_5	0.000**	0.022*	0.003**	0.000**	0.000**	0.506
x_{11}	0.000**	0.014*	0.011*	0.100	0.062	0.084
x_{14}	0.007**	0.092	0.808	0.030*	0.046*	0.042*
x_{15}	0.818	0.710	0.129	0.213	0.692	0.615

说明:**表示在0.01水平上差异极显著,*表示在0.05水平上差异显著

2.3 立地类型划分

根据《中国森林立地类型》的成果对研究区进行立地类型划分^[22],研究区分别以地形(黄土丘陵、土石山地)、坡向(阴坡、阳坡)、土层厚度(薄土层<30 cm、中厚土层≥30 cm)依次划分为:黄土缓坡丘陵立地类型小区一沟坡立地类型组(黄土阴沟坡立地类型、黄土阳沟坡立地类型)、土石山地立地类型小区一低山阴坡立地类型组(低山阴坡薄土立地类型、低山阴坡中厚层立地类型)和低山阳坡立地类型组(低山阳坡薄土立地类型、低山阳坡中厚层立地类型)。该划分方法未考虑草本植物,根据主导因子分析,土层厚度是制约该地油松生长的关键因子。在实际调查中也发现,即使同为低山阴坡中厚层立地类型,样地的油松和草本植物生长都存在着明显差异,说明已有的立地划分结果仍然需要调整。

本研究在《中国森林立地类型》的研究基础上改进,将立地划分因子(地貌、地形、坡向、土壤质地、土层厚度、砾石含量)以及植物生长状况(y_1 , y_2)进行0~1标准化,以系统聚类的方法对38个样地进行

分析。样地之间距离计算选择平方欧氏距离，聚类方法采用离差平方和法，以缩小相同立地类型的样地距离，增大类与类之间的距离。根据聚类分析结果(图 1)及实际调查情况，将 38 个样地划分成 2 个立地类型小区，4 个立地类型组，8 个立地类型，经单因素方差分析检验不同立地类型间的 y_1 和 y_2 有显著差异($P < 0.05$)。立地类型的命名以聚类分析中引起分类不同的立地划分因子为依据，立地划分结果见表 3。

不同立地类型的特征见表 4 和表 5，各立地类型组的主要特征为：
 ①土石山地厚层立地类型组：该立地类型组有平地 and 坡地 2 种地形，土壤主要为壤质砂土，砾石含量较少。坡地立地的坡向为阴坡和半阴坡，土壤厚度均在 40 cm 以上，部分样地甚至可达 60 cm。平地立地位于山间坡谷及低山山脚，土壤厚度可达 100 cm。
 ②土石山地中薄层立地类型组：该立地类型组涵盖了阴坡和阳坡。阳坡土层较薄处的土壤厚度在 20 cm 以内，地表岩石裸露率 10% 以上，平均砾石含量在 30% 以上。土层较厚的立地，土层厚度为 20~40 cm，阳坡土壤中砾石含量平均为 20%~30%，阴坡土壤平均砾石含量在 30% 以上，两者地表岩石裸露的状况较少。

③黄土丘陵砂壤土立地类型组：该立地类型组坡向涵盖阴坡和阳坡，土壤厚度可达数米。阴坡立地土壤中砾石较少，平均砾石含量约 20%，土壤剖面有轻微的钙沉积现象。阳坡立地土壤中砾石较多，土壤剖面有明显的钙积层分布，钙物质附着于土壤颗粒和砾石表面，致使一定范围深度内土壤呈现白色，钙积层最浅处距地表仅约 40 cm。
 ④黄土丘陵黏土立地类型组：该类型组通常在上坡、中坡位置，总面积在黄土丘陵立地类型小区所占较小，坡向的差异对植物生长的影响相对不明显。土壤细粒部分主要为砂质黏土，土层厚度可达数米，土壤砾石含量约 30%。部分土壤剖面中存在钙沉积现象，钙物质以假菌丝状或斑状分布在一定范围内的中深层土壤中。

2.4 林草适宜性评价

研究区属于森林草原与荒漠草原的过渡区，乔木与草本植物对不同立地的适宜性并不相同，因此需对各立地类型进行林草适宜性评价，实现土地合理利用。以 38 个样地中最高的 y_1 和 y_2 值作为满分值，对其余各样地进行打分，并按不同立地类型进行统计。将油松对立地的适宜性分 4 个等级，分别

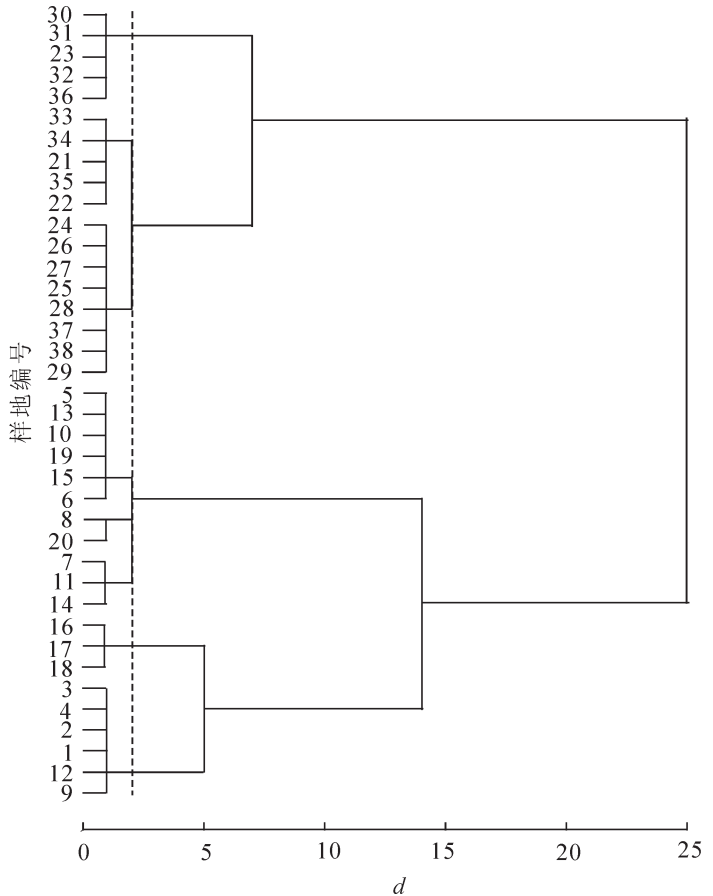


图 1 立地类型划分的聚类分析图
 Figure 1 Cluster analysis of site type classification

表 3 立地类型划分的命名

Table 3 Name of site type classification

立地类型小区	立地类型组	立地类型
(A) 土石山地立地类型小区	(a) 土石山地厚层立地类型组	(I) 低山阴坡厚层砂壤土立地类型
		(II) 平地厚层砂壤土立地类型
	(b) 土石山地中薄层立地类型组	(III) 低山阳坡薄层轻砾石土立地类型
		(IV) 低山阴坡中薄层轻砾石土立地类型
		(V) 低山阳坡中薄层多砾质砂壤土立地类型
(B) 黄土丘陵立地类型小区	(c) 黄土丘陵砂壤土立地类型组	(VI) 黄土丘陵阴坡砂壤土立地类型
		(VII) 黄土丘陵阳坡砂壤土立地类型
	(d) 黄土丘陵黏土立地类型组	(VIII) 黄土丘陵黏土立地类型

表4 研究区立地类型特征

Table 4 Features list of different site types

立地类型	地貌	坡向	质地	土厚/cm	砾石含量/%	容重/(g·cm ⁻³)	田间持水量/%	平均含水率/%	表土含水率/%	油松树高/cm	草本生物量/(g·m ⁻²)
I	土石	阴坡	壤质砂土	≥40	5	1.34	31	13	14	102.3	70.1
II	山地	平地	壤质砂土	≥40	5	1.57	21	6	7	86.8	71.7
III		阳坡	轻砾石土	0~20	32	1.52	25	6	6	70.6	97.7
IV		阴坡	轻砾石土	20~40	34	1.46	24	8	13	79.7	105.3
V		阳坡	壤质砂土	20~40	30	1.45	29	8	13	79.5	107.7
VI	黄土	阴坡	壤质砂土	≥40	20	1.26	35	15	18	123.9	156.5
VII	丘陵	阳坡	壤质砂土	≥40	32	1.36	29	12	17	112.8	162.7
VIII		不定	砂质黏土	≥40	28	1.35	34	13	18	120.8	174.5

说明：坡向不定表示该立地类型包含阴坡和阳坡

表5 研究区不同立地类型土壤化学性质

Table 5 Soil chemical properties of different site types

立地类型	全剖面土壤平均值					表层土壤平均值				
	pH 值	有机碳/(g·kg ⁻¹)	全氮/(g·kg ⁻¹)	全磷/(g·kg ⁻¹)	全钾/(g·kg ⁻¹)	pH 值	有机碳/(g·kg ⁻¹)	全氮/(g·kg ⁻¹)	全磷/(g·kg ⁻¹)	全钾/(g·kg ⁻¹)
I	8.08	8.65	0.81	0.60	12.02	7.79	10.51	0.94	0.63	13.44
II	8.33	11.49	0.77	0.49	13.02	8.54	14.81	0.73	0.57	12.60
III	8.26	18.74	1.03	0.65	16.80	8.26	18.74	1.03	0.65	16.80
IV	8.03	15.76	1.06	0.59	14.50	8.19	17.23	1.17	0.59	16.58
V	8.30	20.34	1.24	0.68	16.06	8.23	22.67	1.22	0.68	16.32
VI	8.19	15.03	0.71	0.56	15.47	8.14	16.32	0.71	0.58	17.69
VII	7.73	9.65	0.47	0.54	13.01	7.77	10.68	0.54	0.63	14.16
VIII	8.18	13.87	0.74	0.60	12.75	8.15	14.49	0.82	0.67	11.27

为：优(y_1 得分 85~100)，良(y_1 得分 70~85)，一般(y_1 得分 60~70)，差(y_1 得分 0~60)；草本植物对立地的适宜性分 3 个等级，分别为：优(y_2 得分 67~100)，一般(y_2 得分 34~66)，差(y_2 得分 0~33)(表 6)。

黄土丘陵立地类型小区的各立地类型组土层深厚，土壤水分较为充沛，同时土壤中砾石含量处于适宜水平，制约植被生长的限制因子较少。因此，黄土丘陵阴坡砂壤土立地类型(VI)，黄土丘陵阳坡砂壤土立地类型(VII)，黄土丘陵黏土立地类型均适宜油松与草本植物生长(VIII)，只需要进行常规的抚育管理即可保证油松长势良好，可优先选择作为造林地。

土石山地立地类型小区油松生长的限制因子为土壤厚度，草本植物的限制因子为砾石含量。低山阴坡厚层砂壤土立地类型(I)土层较厚、土壤平均含水量较高，较为适宜油松生长，而平地厚层砂壤土立地类型(II)土层深厚但土壤含水量偏低，也比较适合油松生长；但这 2 类立地由于表土含水量和砾石含量较低，导致草本植物生物量最低，因此不适合用作放牧草地。低山阴坡中薄层轻砾石土立地类型(IV)和低山阳坡中薄层多砾质砂壤土立地类型(V)的土壤厚度仅约 40 cm，同类地貌条件下油松长势略差但草本植物较好，因此该立地类型用于栽植油松等乔木树种时应加强抚育管理措施，或可考虑营造乔灌结合的防护林，实现防治水土流失的目的。低山阳坡薄层轻砾石土立地类型(III)土层浅薄且土壤含水量较低，油松生长状况较差，该立地类型应当考虑栽植耐旱的浅根系灌木树种，或进行封育以保护原有植被。

表6 不同立地类型植被得分及分级

Table 6 Vegetation suitability scores and classification of different site types

立地类型	y_1 得分	y_2 得分	油松适宜性	草本适宜性	立地类型分级
I	79	32	良	差	第 2 级
II	67	33	一般	差	第 2 级
III	54	45	差	一般	第 4 级
IV	61	48	一般	一般	第 3 级
V	61	50	一般	一般	第 3 级
VI	95	72	优	优	第 1 级
VII	87	75	优	优	第 1 级
VIII	93	80	优	优	第 1 级

3 结论与讨论

3.1 影响植物生长的主导因子

通过多元线性回归分析，本研究区范围内直接影响油松生长的主导因子为土壤厚度和平均土壤含水率，其中土石山地立地类型小区的限制因子为土壤厚度。影响草本生物量的主导因子为土壤含水率、全氮质量分数、全磷质量分数和土壤砾石，其中土石山地立地类型小区的限制因子为土壤砾石含量。

3.2 立地类型划分结果

选取地貌、地形、坡向、土壤质地、土层厚度、砾石含量作为立地类型划分的依据，可将兴和县荒山荒坡划分为 2 个立地类型小区：土石山地立地类型小区(A)和黄土丘陵立地类型小区(B)，4 个立地类型组和 8 个立地类型。

3.3 林草适宜性评价

研究区低山丘陵造林地 8 种立地类型的林草适宜性可分为 4 级：第 1 级包括 VI，VII，VIII 类立地，油松与草本适宜性均为优，植物生长状况良好，可优先选择作为造林地；第 2 级包括 I 和 II 类立地，油松适宜性较良好但草本适宜性较差，适合规划作为造林地，保证正常的抚育管理措施即可；第 3 级包括 IV 和 V 类立地，油松和草本适宜性均一般，营造油松纯林时应加强造林抚育措施，或可营造乔灌结合的防护林；第 4 级包括 III 类立地，草本适宜性一般但油松适宜性较差，造林树种应主要以耐旱浅根系的灌木树种为主，或进行封育以保护原有植被。

现有的森林立地类型划分与评价研究大多是通过测定立地指数或拟合树高生长曲线，对中龄林和成熟林地进行划分与评价。但半干旱地区林业发展相对落后，通常缺少可供调查研究的此类林业资源。同时该地区由于自然条件所限，需要合理规划林地与草地，而目前针对半干旱区林木和草本适宜性综合评价的研究仍然较少。因此本次研究对幼林地进行调查，既考虑到了当地的林业发展现状，同时在幼林地内草本植物生长尚未受到造林影响的阶段，评价不同立地类型的林木与草本适宜性，为类似地区的适宜性评价研究提供参考。

目前，无林地立地评价研究普遍将土壤养分状况视为重要的评价指标^[31-32]，往往没有区分林木与草本适宜性^[33]。半干旱地区由于大风天气频繁，土壤抗风蚀能力比养分状况对草本植物的生长更加重要，因此，土壤砾石含量是风沙区立地草本植物适宜性的重要指标；而对于油松这样的深根系树种，土层厚度 30 cm 仍不是土壤厚度分类的最优区分界限。与以往栗钙土区研究中钙积层显著影响树木生长的情况不同^[34]，本研究发现，存在钙沉积现象的黄土丘陵各立地类型的植被生长状况良好。一方面，研究区土壤主要以砂壤土为主，钙沉积现象轻微，土壤紧实度差而不易产生质密坚硬的不透水层^[35]，水分状况较以往研究更好；另一方面，目前油松林处于幼龄林阶段，今后钙积层是否对树木生长产生影响仍有待观察。

4 参考文献

- [1] 沈国舫, 邢北任. 北京市西山地区立地条件类型的划分及适地适树[J]. 林业实用技术, 1980(6): 11 - 16.
SHEN Guofang, XING Beiren. Site condition classification and matching species with the site of western mountain area in Beijing [J]. *Prat For Technol*, 1980(6): 11 - 16.
- [2] FONWEBAN J N, TCHANOU Z, DEFO M. Site index equations for *Pinus kesiya* in Cameroon [J]. *J Trop For Sci*, 1995, 8(1): 24 - 32.
- [3] 温阳, 田润民, 刘宗顺, 等. 内蒙古东南部山地人工林造林立地质量评价[J]. 内蒙古林业科技, 2009, 35(3): 5 - 12.
WEN Yang, TIAN Runmin, LIU Zongshun, et al. Evaluation on site quality of plantation in mountainous area in southeast of Inner Mongolia [J]. *J Inner Mongolia For Sci Technol*, 2009, 35(3): 5 - 12.
- [4] MARINA D, THOMAS S C. An analysis of the modeling and inventory support tool: yield curves vary with forest ecosystem classification [J]. *For Chron*, 2012, 88(2): 147 - 153.
- [5] LEKWADI S O, NEMESOVA A, LYNCH T, et al. Site classification and growth models for *Sitka spruce* plantations in Ireland [J]. *For Ecol Manage*, 2012, 283(6): 56 - 65.

- [6] 马伟, 孙玉军. 长白落叶松人工林立地指数表和胸径地位级表的编制[J]. 东北林业大学学报, 2013, **41**(12): 21 – 25.
MA Wei, SUN Yujun. Compilation of site index table and site class table for *Larix olgensis* plantations [J]. *J North-east For Univ*, 2013, **41**(12): 21 – 25.
- [7] 王高峰. 森林立地分类研究评介[J]. 南京林业大学学报, 1986, **10**(3): 108 – 124.
WANG Gaofeng. A review of the study of forest site classification [J]. *J Nanjing For Univ*, 1986, **10**(3): 108 – 124.
- [8] 李忠国. 北亚热带中山区日本落叶松人工林立地分类与质量评价[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011.
LI Zhongguo. *Site Classification and Evaluation of Larix kaempferi (Lamb.) Carr. in Northern Sub-tropical Medium High Area* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2011.
- [9] 王冬至, 张冬燕, 蒋凤玲, 等. 塞罕坝华北落叶松人工林地位指数模型[J]. 应用生态学报, 2015, **26**(11): 3413 – 3420.
WANG Dongzhi, ZHANG Dongyan, JIANG Fengling, et al. A site index model for *Larix principis-rupprechtii* plantation in Saihanba, north China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2015, **26**(11): 3413 – 3420.
- [10] FINCHER J, SMITH M L. *A Discriminant-Function Approach to Ecological Site Classification in Northern New England* [R]. Radnor: USDA Forest Service NE-686, 1994.
- [11] JONES A T, GALBRAITH J M, BURGER J A. Development of a forest site quality classification model for mine soils in the appalachian coalfield region [C]//*The 2005 National Meeting of the American Society of Mining and Reclamation*. Lexington: American Society of Mining and Reclamation, 2005: 523 – 539.
- [12] WALL A, WESTMEN C J. Site classification of afforested arable land based on soil properties for forest production [J]. *Can J For Res*, 2011, **36**(6): 1451 – 1460.
- [13] WU Yao, QIN Kailun, ZHANG Minghua, et al. Study on forest site classification of southern Xiaoxing'an Mountain in northeast of China [J]. *World Rural Obser*, 2013, **5**(4): 27 – 32.
- [14] CURT T, BOUCHAUD M, AGRECH G. Predicting site index of Douglas-fir plantations from ecological variables in the Massif central area of France [J]. *For Ecol Manage*, 2001, **149**(1): 61 – 74.
- [15] WILSON S M, PYATT D G, RAY D, et al. Indices of soil nitrogen availability for an ecological site classification of British forests [J]. *For Ecol Manage*, 2005, **220**(1): 51 – 65.
- [16] 赖挺, 张健, 冯茂松, 等. 四川巨桉主要引种区人工林立地类型划分[J]. 四川农业大学学报, 2005, **23**(3): 318 – 322.
LAI Ting, ZHANG Jian, FENG Maosong, et al. *Eucalyptus grandis* site type classification of major introduction districts in Sichuan [J]. *J Sichuan Agric Univ*, 2005, **23**(3): 318 – 322.
- [17] 马明东, 罗承德, 张健, 等. 云杉天然林分生境条件数量分类研究[J]. 中国生态农业学报, 2006, **14**(2): 159 – 163.
MA Mingdong, LUO Chengde, ZHANG Jian, et al. Quantitative classification of site condition in natural forest of *Picea asperata* [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2006, **14**(2): 159 – 163.
- [18] 杜健, 梁坤南, 周再知, 等. 云南西双版纳柚木人工林立地类型划分及评价[J]. 林业科学, 2016, **52**(9): 1 – 10.
DU Jian, LIANG Kunnan, ZHOU Zaizhi, et al. Site classification and evaluation of teak plantation in Xishuangbanna, Yunnan Province, China [J]. *Sci Silv Sin*, 2016, **52**(9): 1 – 10.
- [19] LI Bingwen, XU Xinwen, LEI Jiaqiang, et al. Site type classification for the shelter-forest ecological project along the Tarim Desert Highway [J]. *Chin Sci Bull*, 2008, **53**(S2): 31 – 40.
- [20] 吕仕洪, 陆树华, 李先琨, 等. 广西平果县石漠化地区立地划分与生态恢复试验初报[J]. 中国岩溶, 2005, **24**(3): 196 – 201.
LÜ Shihong, LU Shuhua, LI Xiankun, et al. Site types of the rocky desertification area and preliminary ecologic restoration test in Pingguo County, Guangxi [J]. *Carsolog Sin*, 2005, **24**(3): 196 – 201.
- [21] 李世东. 中国退耕还林研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [22] 张万儒. 中国森林立地分类[M]. 北京: 中国林业出版社, 1989.
- [23] 詹昭宁. 中国森林立地类型[M]. 北京: 中国林业出版社, 1995.
- [24] 李高峰, 张奋红, 苏自成. 兴和县低效林现状成因及改造模式探讨[J]. 内蒙古林业调查设计, 2016, **39**(1):

58 – 59.

LI Gaofeng, ZHANG Fenhong, SU Zicheng, *et al.* Study on the reasons, status quo and transformation mode of low quality forest in Xinghe [J]. *Inn Mong For Invest Des*, 2016, **39**(1): 58 – 59.

- [25] 沈国舫, 杨敏生, 韩明波. 京西山区油松人工林的适生立地条件及生长预测[J]. 林业科学, 1985, **21**(1): 10 – 19.

SHEN Guofang, YANG Minsheng, HAN Mingbo. Suitable sites for and growth prediction of *Pinus tabulaeformis* plantation in western mountain area in Beijing [J]. *Sci Silv Sin*, 1985, **21**(1): 10 – 19.

- [26] 杨美灵. 蛮汉山樟子松、油松人工林生长规律及对环境响应研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2008.
YANG Meiling. *Studies on the Growth Pattern and Response to Environment of Artificial Pinus sylvestris and Pinus tabulaeformis in Manhan Mountain* [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2008.

- [27] 田国恒, 马莉, 李雷, 等. 冀北山地阴坡油松林生长规律研究[J]. 河北林业科技, 2013(6): 16 – 17.

TIAN Guoheng, MA Li, LI Lei, *et al.* Study on the growth of *Pinus tabulaeformis* in the shady slope of the mountain, northern Hebei [J]. *J Hebei For Sci Technol*, 2013(6): 16 – 17.

- [28] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2013.

- [29] 许宗文, 骆汉, 赵廷宁, 等. 基于 GIS 的复杂地形下的太阳直接辐射分布规律[J]. 中国水土保持科学, 2014, **12**(3): 113 – 118.

XU Zongwen, LUO Han, ZHAO Tingning, *et al.* Direct distribution of solar radiation in complex terrain base on GIS [J]. *Sci Soil Water Conserv*, 2014, **12**(3): 113 – 118.

- [30] 许宗文. 兴和县公益林造林技术与生态效益评价[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.

XU Zongwen. *Afforestation Technology and The Ecological Benefit Evaluation of Public Welfare Forest in Xinghe County* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014.

- [31] 郭艳荣, 刘洋, 吴保国. 福建省宜林地立地质量的分级与数量化评价[J]. 东北林业大学学报, 2014, **42**(10): 54 – 59.

GUO Yanrong, LIU Yang, WU Baoguo. Evaluating dividing rank and quantification of site quality of suitable land for forest in Fujian Province, China [J]. *J Northeast For Univ*, 2014, **42**(10): 54 – 59.

- [32] 张勇, 李土生, 潘江灵, 等. 连云港市云台山宜林荒山立地质量分类及评价[J]. 水土保持通报, 2014, **34**(3): 171 – 177.

ZHANG Yong, LI Tusheng, PAN Jiangling, *et al.* Site quality classification and assessment in barren hills for suitable afforestation in Yuntai Mountains of Lianyungang City [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2014, **34**(3): 171 – 177.

- [33] 赵雨森. 半干旱退化草牧场造林立地类型划分、评价与适地适树研究[J]. 中国生态农业学报, 2001, **9**(3): 31 – 34.

ZHAO Yusen. Studies on division, assessment, suitable land and tree of afforestation site type in semi-dry deteriorated grass fan [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2001, **9**(3): 31 – 34.

- [34] 闫培君, 吴彤, 王琰. 乌兰察布市土壤钙积层对林木根系分布和林木生长影响情况研究[J]. 内蒙古科技与经济, 2011(9): 63 – 64.

YAN Peijun, WU Tong, WANG Yan. Research on soil calcium accumulation effect on root distribution and trees growth in Ulanqab [J]. *Inn Mong Sci Technol Econ*, 2011(9): 63 – 64.

- [35] 蔡郁文. 栗钙土造林技术初探[J]. 林业资源管理, 1984(6): 49 – 51.

CAI Yuwen. Study on afforestation technology of chestnut soil [J]. *For Resour Manage*, 1984(6): 49 – 51.