

黄土丘陵区油松人工林与天然林 养分分布和生物循环比较

张希彪^{1,2}, 上官周平^{2*}

(1. 陇东学院生命科学系, 甘肃 庆阳 745000; 2. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨陵 712100)

摘要:对黄土丘陵区油松人工林和天然林的养分积累与分配以及养分循环特征进行了比较研究, 结果表明: (1) 油松林各组分养分含量的变化趋势为: 针叶 > 树枝 > 树皮 > 树根 > 树干; 地上部分的养分在针叶、树枝、树干和凋落物中呈: $Ca > N > K > Mg > P$ (林型 I 的针叶、枝干和林型 IV 的树枝 N 含量较其它元素含量高), 而在土壤层中呈: $Ca > K > Mg > N > P$; 不同林型内各养分含量因林龄的不同而有差异。 (2) 油松林生态系统中养分总贮量的 80.83% ~ 98.81% 集中在土壤组分中, 乔木层养分量占总贮量的 0.76% ~ 5.52%, 林下植被层和凋落物层的养分贮量分别占系统总贮量的 0.05% ~ 0.17% 和 0.38% ~ 3.48%。人工油松林的养分贮量随抚育林龄的增加先升后降, 30a 时养分贮量最大, 50a 时养分贮量明显降低, 其中 N 素衰减较其它养分快 (30 龄油松林是 50 龄油松林的 4.23 倍)。 (3) 油松林地上部分养分贮量主要集中在针叶, 且随着抚育林龄的增加, 针叶不但贮量增加而且占地上各组分总贮量比例也增大, 树枝和树干只是绝对贮量增加, 但所占地上总贮量的比例下降。 (4) 油松林地上部分养分的年积累量以 30a 人工林最高, 变化趋势为 $II > III > IV > I$ 。各组分养分的年积累量总的变化趋势为: 针叶 > 树枝 > 根系 > 树皮 > 树干, 同一组分各养分年积累量与各组分养分贮量变化顺序基本一致, 即 10 年生幼林为 $N > Ca > K > P > Mg$, 人工成熟林 $Ca > N > K > P > Mg$, 天然林与人工成熟林相似。 (5) 天然林的吸收量、存留量明显高于人工林。人工林随着抚育林龄的增加, 吸收量和归还量增大, 存留量和循环系数先增后降。各林地油松利用系数为: $Ca > Mg > N > K > P$, 但同一养分利用率, 油松人工林随着林龄的增加而降低, 油松天然林与人工成熟林的利用系数和周转期相似。

关键词: 油松林; 人工林; 天然林; 养分分布格局; 养分循环; 黄土高原

文章编号: 1000-0933(2006)02-0373-10 **中图分类号:** Q143, Q948, S718.5 **文献标识码:** A

Nutrient distributions and bio-cycle patterns in both natural and artificial *Pinus tabulaeformis* forests in Hilly Loess Regions

ZHANG Xi-Biao^{1,2}, SHANGGUAN Zhou-Ping² (1. Longdong University, Qingyang Gansu 745000, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(2): 373 ~ 382.

Abstract: *Pinus tabulaeformis* forests as dominant communities in Ziwuling Mountain lying in Hilly Loess Regions, its nutrient distributions and bio-cycle patterns in both natural and artificial *Pinus tabulaeformis* forests were studied in this paper. The results were shown as follows: (1) Changes in nutrient contents for different components in the same *Pinus tabulaeformis* forest stood in the order of needles > branches > bark > roots > bole, and aboveground nutrient elements in needles, branches, bark, bole and litterfalls stood in the order of $Ca > N > K > Mg > P$ (N contents were higher than other nutrient elements in needles,

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目 (2002CB111502); 甘肃省教育厅重点资助项目 (049B-08); 西北农林科技大学拔尖人才计划资助项目

收稿日期: 2004-10-07; **修订日期:** 2005-04-11

作者简介: 张希彪 (1963-), 男, 甘肃省武威市人, 硕士, 副教授, 主要从事植物生态与景观生态学研究. E-mail: zhangxibiao882@163.com

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: shangguan@ms.iswc.ac.cn

Foundation Item: The project was supported by National State Key Basic Research and Development Plan (No. 2002CB111502) and the Key Project of Gansu Education Office (No. 049B-08), and the Program for Excellent Talents in Northwest A & F University

Received date: 2004-10-07; **Accepted date:** 2005-04-11

Biography: ZHANG Xi-Biao, Master, Associate professor, mainly engaged in plant ecology and landscape ecology. E-mail: zhangxibiao882@163.com

branches and bole for stand I and in branches for stand IV), but nutrients stored in the soil stood in the order of $\text{Ca} > \text{K} > \text{Mg} > \text{N} > \text{P}$. The accumulative amounts of nutrient differed much among various forest stands because of differences in forest-ages. (2) The artificial forest with 30a had the highest nutrient amounts in *Pinus tabulaeformis* forest ecosystems, and accumulative nutrients in the arbor layer accounted for 0.76% ~ 5.52% of total amounts, while that in the forest floor and litterfalls layers accounted for 0.05% ~ 0.17% and 0.38% ~ 3.48%, respectively. The accumulative amounts of nutrient increased first and then decreased with increased forest-ages in artificial *Pinus tabulaeformis* forest. The nutrient amounts reached maximum when the stand was 30-year, and decreased greatly when it was 50-year. Particularly, N contents decreased faster than other nutrient elements, and the reduction rate of N contents in the 30a *Pinus tabulaeformis* forest was 4.23 times as much as that in 50a stand. (3) The aboveground nutrients largely stored in the needles for *Pinus tabulaeformis* forest, and with increased forest-ages, needles not only increased its nutrient amounts, but also enhanced the proportion of total amounts in aboveground components. However, branches and bole only increased their absolute amounts, while decreased their proportions of total aboveground amounts. (4) The artificial *Pinus tabulaeformis* forest with 30a had the highest annual accumulative amounts of nutrient elements, and different stands stood in the order of $\text{II} > \text{III} > \text{IV} > \text{I}$. Comparison of annual accumulative nutrient amounts in different components stood in the order of needles > branches > roots > bark > bole. Changes in annual amounts of various nutrients in the same component was similar to that in various components, that is, $\text{N} > \text{Ca} > \text{K} > \text{P} > \text{Mg}$ in 10a young forests and $\text{Ca} > \text{N} > \text{K} > \text{P} > \text{M}$ in artificial matured forests. So there is a parallel between natural forests and artificial matured forests. (5) The amounts of nutrient annually taken in from and annually retained in the natural forests were significantly higher than that in artificial *Pinus tabulaeformis* forest. With increased forest-ages, the amounts of nutrient annually taken in from and annually released to soil were increased in artificial *Pinus tabulaeformis* forest, but annually retained amounts increased first and then decreased. The nutrient use coefficient in various *Pinus tabulaeformis* stands stood in the order of $\text{Ca} > \text{Mg} > \text{N} > \text{K} > \text{P}$, but use efficiency of the same nutrient element decreased with increased forest-ages. There was no differences in use coefficient and turning over-period of nutrients in both natural and artificial matured *Pinus tabulaeformis* forest. The cycling coefficients of nutrient elements increased first and then decreased with increased forest-ages.

Key words: the Loess Plateau; coniferous forest; nutrient cycle; *Pinus tabulaeformis* forest; artificial forest

由于气候及人为等因素的影响,黄土高原地区的原始天然林植被已被破坏殆尽,生态系统的结构与功能受到显著影响。以退耕还林还草工程为主的植被建设有利于改善区域生态环境、提高生态系统的生产力,但目前黄土高原地区植被生态建设由于立地条件恶化,出现了土壤水分的低湿层和利用性干层等问题,使得人工林草植被的进一步发育演化受到阻碍^[1-6],人工植被群落的系统生产力逐渐降低,景观特征呈现退化和衰败的迹象^[5-8]。

油松(*Pinus tabulaeformis*)是黄土高原地区广泛分布的常绿针叶树种,也是暖温带湿润半湿润气候区的地带性植被^[1-3,9,10]。它既喜湿润肥沃的土壤,又耐干旱瘠薄,有较强的适应性和抗逆性,萌蘖力强,根系发达,同时具有很好的保持水土、涵养水源及改良土壤的作用,被认为是黄土高原地区退耕还林过程中的优良树种。由于油松具有广阔的分布区域和种类的多样性,油松林的营养元素含量和营养元素循环特征在空间上和种类上产生分异,特别是营养元素循环特征的空间分异具有代表性。空间上的分异除在大范围表现外,在局部地区由于生境和其他外界因素的作用也有所表现^[11]。对油松林养分循环的研究不仅能揭示该生态系统物质循环机制,而且对指导林业生产、调节和改善林木生长的环境、提高系统的养分利用率和最大限度地提高生产力具有重要意义^[12-14]。有关黄土区油松林地群落结构、生物生产力、水源涵养功能及养分问题研究有过不少报道^[6-8,12-18],但对油松人工林不同林龄养分循环动态和趋势以及与次生天然林的比较尚缺乏深入研究。为此,以黄土丘陵区的子午岭林区为研究区域,对不同林龄人工油松林及次生天然林营养元素的分布规律及其生物循环特征进行了研究,以揭示森林经营方式对森林土壤肥力的影响,阐明维持黄土区林地生产力的机理和生态过程,为进一步探讨该区域森林植被的建设和管理提供理论基础。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区自然概况

研究区位于黄土高原中部子午岭林区南端的甘肃正宁县中湾林场,地理坐标为 108°27'E,35°17'N,属黄土堆积与河流侵蚀的不断交替而形成的黄土丘陵沟壑地貌,海拔 1246 ~ 1756m,具有明显的大陆性气候特征,属暖温带冷凉半湿润气候区^[6]。多年平均气温 9.3℃,降水量 588.2mm,其中 7 ~ 9 月份降水占到 63%,年蒸发量 1228.3mm,干燥度 0.72,空气相对湿度 60% ~ 70%,年日照时数 2200 ~ 2400h,无霜期 163d,≥10℃积温 2645.3℃。土壤以森林灰褐土为主,pH 值为 7.5 ~ 8.2。由于受自然地理和气候条件的影响,该区森林植被及其资源的分布在阴阳坡差异很大。一般阳坡、梁峁少林或无林,多为灌木林或草本,阴坡和沟谷多为次生天然林^[1,6,8]。

该区处于森林草原、半干旱草原过渡地带,森林大部分系屡经破坏后而形成的天然次生林。在中国植物区系上隶属于泛北极植物区、中国-日本森林植物亚区的华北地区黄土高原植物亚地区^[6]。天然油松常形成单优群落,主林层主要由油松占据,但混有一定数量的演替先锋树种,如山杨(*Populus davidiana*)、白桦(*Betula platyphylla*)、杜梨(*P. betulaefolia*)等。同时随林龄阶段的变化亦出现由幼苗组成的更新层和幼树组成的更替层,并出现了大量的辽东栎(*Qercu sliaotungensis*)、青桦槭(*A. davidii*)、漆树(*Toxicodendron verniciflnum*)等阔叶树种,表现出良好的恢复和向原始类型靠近的发展趋势。林下灌木层有虎榛子(*Ostryopsisdavidiana*)、胡枝子(*L. bicolor*)、黄刺玫(*Rose xanthina*)、樱草蔷薇(*Rosa primula*)、灰栒子(*Cotoneaster acutifolius*)、水栒子(*Cotoneastermultiflorus*)、土庄绣线菊(*Spiraea pubescens*)、毛樱桃(*Prunustomentosa*)、茶条槭(*A. ginnala*)、陕西荚蒾(*Viburnum schensianum*)、北京丁香(*Syringa pekinensis*)、忍冬(*Lonicera ssp.*)、卫矛(*Euonymus alatus*)等;草本层主要有披针苔草(*Carexlanceolata*)、唐松草(*Thalictrum ssp.*)、糙苏(*Phlomis umbrosa*)、茜草(*Rubiaccordigfolia*)、淫羊霍(*Epimedium brevicorum*)、卷叶黄精(*Polygonatum cirrhifolium*)、大火草(*Anemone tomentosa*)、异叶败酱(*Patrinia heterophyua*)等^[6]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择及乔木层生物量的测定 本研究采用时空代互法,将立地条件基本一致的 10 龄(I)、30 龄(II)、50 龄(III)人工油松林视为不同的人工恢复阶段,以 80 龄天然油松林(IV)为对照(CK),各林型的立地条件见表 1。在 4 种林型下分别设置标准样地各 4 块,面积为 667m²,采用克拉夫特分级法对样地内的林木分级,进行每木检尺,测算出样地内各生长级和样地平均木的平均胸径与平均树高,然后选取各生长级和平均木等标准木共 6 株,将标准木伐倒,采用 Monsic 分层切割法测定林木各组分的生物量,建立相对生长方程推算林分的生物量。用全挖法测定林木根系生物量,用树干解析法确定并计算林木年净生产量。

表 1 油松林研究样地立地与林分因子概况

Table 1 Site conditions and stand factors in various <i>Pinus tabulaeformis</i> forests									
林型 Stands	代码 No.	林龄 Forest-age (a)	海拔 Altitude (m)	坡向 Aspect (°)	坡度 Slope (°)	平均树高 Average height (m)	郁闭度 Canopy closure	密度 Density (Tree·hm ⁻²)	植物种数 Numbers of Species
10 龄人工油松林 10a	I	9 ~ 11	1562	NE50°	25°	3.2	0.60	2870	23
30 龄人工油松林 30a	II	28 ~ 32	1598	SW40°	35°	10.8	0.75	2250	32
50 龄人工油松林 50a	III	45 ~ 50	1600	SW30°	30°	13.5	0.85	2150	14
80 龄天然油松林 80a	IV	70 ~ 75	1620	SW55°	28°	16.3	0.70	2100	12

I、II、III 分别代表 10、30、50 龄人工油松林;IV 代表天然油松林 I, II and III represent 10-, 30- and 50-year-old of artificial *Pinus tabulaeformis* forest, respectively; No. IV represents natural *Pinus tabulaeformis* forest; 下同 the same below

1.2.2 林木样品采集 按照上、中、下 3 个层次,用扇形法分别采取树干、树皮样品;按照枝径等级在树冠中部分别采集枝条样品;依据叶龄及树冠部位分别采集针叶样品;根系样品按照根径大小等级分别采集后混合。各针叶样品为 15 个重复,其它器官样品均为 10 个重复。

1.2.3 林下植物及凋落物样品采集 在标准样地内,按梅花形布设 10 个 4m×4m 的灌木样方和 20 个 1m×1m

的草本样方,灌木层分树叶、枝干取样,草本层取混合样,根系取混合样,测定各自生物量;凋落物分解层和未分解层分别取样,各样品均重复 5 次。同时,在同一地点进行土壤(0~60cm)取样,测定土壤物理性质,并取样 1000g 带回实验室进行土壤养分含量等指标的测定。

1.2.4 营养元素测定 将外业采集的植物样在 85℃ 下烘干、粉碎、装瓶;测定营养元素含量时,105℃ 下烘 1h,准确称取 0.2~0.5g 样品,用 H₂SO₄-H₂O₂ 凯氏消煮法溶样备用。土样自然风干,过 1mm 筛备用。

植物样分析:N 用硫酸-高氯酸消煮-靛酚蓝分光光度法测定;P₂O₅ 用钼锑钒分光光度法测定;K₂O 用火焰光度计法测定;CaO、MgO 用 EDTA 络合滴定法测定。

土样分析:全 N 用 H₂SO₄-CuSO₄-Se 消煮-碱解扩散吸收法测定;全 P 用酸溶-钼蓝比色分光光度法测定;全 K 用 NaOH 溶解-火焰光度计法测定;速效 N 用碱解扩散吸收法测定;速效 P 用 NH₄F-HCl 浸提-钼蓝比色分光光度法测定;速效 K 用 NH₄OAC 浸提-火焰光度计法测定;Ca、Mg 用 EDTA 络合滴定法测定。

2 结果与讨论

2.1 油松林各器官营养元素的分布特征

植物中营养元素的分布特征一方面反映了植物自身的生理特性,是植物长期演化的结果;另一方面,受到所处生境条件的影响,生境中的土壤肥力状况是影响植物生长发育及元素分布的重要因素^[11~14]。由于植物不同器官的生理机能不同,不同营养元素在植物体内的功能不同,营养元素在植物不同器官及不同营养元素在同一器官中的分布也有差异。油松林不同林龄阶段各器官的养分含量差异较大,同一油松林地上各组分的养分含量,以针叶中含量最高,树干中最低(表 2),其排序为:针叶>树枝>树皮>树根>树干。同一油松林地内各养分含量的大小因组分不同而异,林型Ⅱ和Ⅲ为 N>Ca>K>Mg>P;林型Ⅰ和Ⅳ为:N>Ca>K>P>Mg。

表 2 不同油松林地类型各组分的养分含量

Table 2 Nutrient contents in different components of *Pinus tabulaeformis* forest stands

林型 Stands	组分 Components	营养元素含量 Nutrient element contents(g·kg ⁻¹)					林型 Stands	组分 Components	营养元素含量 Nutrient element contents(g·kg ⁻¹)				
		N	P	K	Ca	Mg			N	P	K	Ca	Mg
Ⅰ	Ne	15.31	1.45	4.01	2.11	0.53	Ⅲ	Ne	9.32	1.25	6.24	5.90	1.16
	Br	5.71	1.26	3.98	2.35	0.28		Br	2.03	0.49	1.87	4.54	0.69
	Bo	1.57	0.81	0.62	0.62	0.04		Bo	0.76	0.10	0.40	0.86	0.11
	Ba	6.68	1.04	1.93	2.36	0.35		Ba	2.70	0.44	2.74	3.41	0.55
	Ro	3.20	0.68	1.30	1.27	0.31		Ro	2.09	0.47	2.40	2.23	0.57
Ⅱ	Ne	10.84	1.23	5.95	6.14	1.16	Ⅳ	Ne	10.13	1.24	5.35	6.89	1.12
	Br	3.95	0.58	4.27	4.66	0.74		Br	3.69	0.92	3.06	3.08	0.60
	Bo	0.93	0.10	0.83	0.85	0.09		Bo	0.91	0.14	0.57	0.87	0.08
	Ba	3.64	0.41	2.42	3.72	0.74		Ba	2.87	0.68	2.62	3.42	0.78
	Ro	2.77	0.43	2.78	2.57	0.56		Ro	2.71	0.67	2.08	2.68	0.71

Ne: 针叶 Needles; Br: 树枝 Branches; Bo: 树干 Bole; Ba: 树皮 Bark; Ro: 根系 Roots

不同林型内各养分含量,因林龄的不同而存在差异。N 和 P 在人工林同一组分中均表现为随林龄的增加,其含量降低,可能是随林龄的增加,林内物种趋于单一,林内光照减弱、水分条件变差,凋落物分解难度加大,林内小生境恶化,土壤中 N 和 P 含量降低有关^[13,14]。在天然油松林中,N 与 30 龄油松林相似,P 的含量低于人工幼林而高于人工成熟林。Ca 以天然油松林中最高,人工油松林有随着抚育林龄的增加而增大的趋势。Ca、Mg 在早期的含量只有成熟期的 1/2~1/3,在成熟期的变化不大。

2.2 不同油松林生态系统的养分贮量和分配

黄土高原子午岭油松林生态系统营养元素总贮量为 16491.019~20413.968kg·hm⁻²(包括 0~60cm 土层)。从不同林型营养元素积累量的变化来看,以林型Ⅱ林分中营养元素积累量最大,而林型Ⅲ最小,与林分生物量变化规律相似,但与生物量不成比例。这主要取决于林分生物量及其各组分营养元素含量,但土壤的

物理、化学性质也是导致林分营养元素积累量差异的主要原因之一。

森林生态系统中,乔木层是最活跃、最重要的亚系统,该系统所进行的初级生产既是能量的固定过程,亦是营养元素的积累过程。子午岭油松林乔木层营养元素积累量分别为 130.811 kg·hm⁻²(Ⅰ)、807.759 kg·hm⁻²(Ⅱ)、819.457 kg·hm⁻²(Ⅲ)和 1102.444 kg·hm⁻²(Ⅳ),占林分营养元素总贮量的 0.76%~5.52%,而且各器官营养元素积累量也存在明显的差异(表 3),植物体内各组分生理活性不同及不同组分间生物量的差异是导致植物体内不同组分养分贮量差异的主要原因^[14]。

在人工油松林中,树枝和树干的各养分贮量,随着抚育林龄的增加而增大,但所占地上部分总贮量的比例下降。说明人工油松林达成熟纯林后,叶的迅速增加是造成林内郁闭度加大,植物种数减少的主要原因。油松林地上同一组分各养分贮量的变化趋势为:10 龄幼林 N>Ca>K>Mg>P,成熟林为 Ca>N>K>Mg>P。

林下植被层营养元素积累量仅占林分养分总贮量的 0.05%~0.17%(表 4)。随林龄的增加,林下植被层营养元素所占的比例大幅度下降,主要是随林分的郁闭度增加,林下层植物大量减少,形成单层结构,生态位高度重叠,造成物种多样性减少^[15]。10 龄幼林营养元素的排序为 K>N>Ca>Mg>P,而成熟林排序为 N>K>Ca>Mg>P,这种差异主要是构成林下植被的物种不同。

表 3 子午岭油松林乔木层营养元素的积累量

Table 3 Nutrient element accumulation in arbor layer of <i>Pinus tabulaeformis</i> forests in Ziwuling Mountain								
林分类型 Forest types	组 分 Components	生物量 Biomass (t·hm ⁻²)	营养元素含量 Nutrient element contents(kg·hm ⁻²)					合计 Total
			N	P	K	Ca	Mg	
Ⅰ	树叶 Needles	2.61	31.842	3.785	10.466	5.507	1.383	52.983
	树枝 Branches	2.17	12.391	2.734	8.637	5.099	0.608	29.469
	树干 Bole	3.79	5.950	3.070	2.350	2.350	0.152	13.871
	树皮 Bark	1.33	8.884	1.383	2.567	3.139	0.466	16.439
	根系 Roots	2.67	8.544	1.816	3.471	3.391	0.828	18.049
	合计 Total	12.57	67.611	12.787	27.490	19.486	3.436	130.811
Ⅱ	树叶 Needles	12.23	132.573	15.043	72.769	75.092	14.187	309.664
	树枝 Branches	12.65	49.968	7.337	54.016	58.949	9.361	179.630
	树干 Bole	35.58	33.089	3.558	29.531	30.243	3.202	99.624
	树皮 Bark	8.42	30.649	3.452	20.376	31.322	6.231	92.031
	根系 Roots	13.92	38.558	5.986	38.698	35.774	7.795	126.811
	合计 Total	82.8	284.837	35.376	215.389	231.381	40.776	807.759
Ⅲ	树叶 Needles	11.92	111.094	14.900	74.381	70.328	13.827	284.530
	树枝 Branches	14.32	29.070	7.017	26.778	65.013	9.881	137.758
	树干 Bole	53.64	40.766	5.364	21.456	46.130	5.900	119.617
	树皮 Bark	10.36	27.972	4.558	28.386	35.328	5.698	101.942
	根系 Roots	22.63	47.297	10.636	54.312	50.465	12.899	175.609
	合计 Total	112.87	256.199	42.475	205.314	267.264	48.206	819.457
Ⅳ	树叶 Needles	14.11	142.934	17.496	75.489	97.218	15.803	348.940
	树枝 Branches	16.63	61.365	15.2996	50.888	51.220	9.978	188.751
	树干 Bole	67.62	61.534	9.468	38.543	58.829	5.410	173.783
	树皮 Bark	13.26	38.056	9.018	34.741	45.349	10.343	137.506
	根系 Roots	28.64	77.614	19.189	59.571	76.755	20.334	253.464
	合计 Total	140.26	381.504	70.468	259.232	329.372	61.868	1102.444

凋落物作为森林生态系统物质循环过程中的一个重要物质库,是森林土壤自然肥力的重要来源^[15-23]。子午岭油松林林下凋落物层贮存的营养元素分别为 76.94kg·hm⁻²(Ⅰ)、471.78kg·hm⁻²(Ⅱ)、396.51kg·hm⁻²(Ⅲ)、435.33kg·hm⁻²(Ⅳ)(表 4),占林分养分总贮量的 0.38%~3.48%。林下凋落物的养分贮量随林龄的增加先增后降,30a 生油松林凋落物贮量最大。由于林地凋落物是土壤有机质和养分的主要供给者,人工油松林在生长后期,凋落物及其养分贮量急剧下降,土壤肥力处于耗损阶段,生物与土壤间物质和能量的交换能力减弱,势必导致土壤有机质、养分和综合肥力的降低。各林分凋落物中各种营养元素含量排序不尽相同,这种

差异可能是由于不同林分对营养元素吸收强度不同和凋落前各营养元素的转移不同所致。

在油松林生态系统中,地下部分集中了大部分养分(表 4)。在人工油松林中,随着林龄的增加,土壤中各养分贮量所占各自总贮量的比例先升高而后大幅度地降低,如幼林土壤中各养分贮量占各自总贮量的比例分别为:90% (N)、75.54% (P)、92.28% (K)、96.99% (Ca)、97.78% (Mg),至 50 龄人工油松林,其比例降为:72.01% (N)、50.55% (P)、64.81% (K)、81.99% (Ca)和 63.13% (Mg)。天然油松林土壤中各养分贮量占其总贮量的比例为:78.14% (N)、51.81% (P)、72.50% (K)、81.63% (Ca)和 67.85 (Mg),与人工林有所不同。由于土壤全量养分可映土壤的潜在肥力,所以,用营造油松林进行生态恢复,当其达到成熟林后土壤养分均有大幅度下降的趋势,从而导致土壤肥力降低。

植被演替主要通过物种竞争来推动,土壤作为植被演替的重要环境条件,它不但促进前一种植被群落灭亡,而且为后续群落演替创造条件^[13]。土壤肥力是土壤的基本属性和质量特征,它对群落演替的影响不容忽视。某一阶段土壤肥力状况,不仅反映了在此之前群落与土壤协调作用的结果,同时也决定了后续演替群落的土壤肥力基础和初始状态。子午岭的油松林大部分是在次生林采伐的迹地上进行人工抚育而成,立地继承了原始林累积的大量凋落物,土壤肥力较高,油松林生长迅速,但由于人工种植前实施清林过程,灌木、草本被清除,林地生物归还能力极低,土壤肥力迅速下降,在油松林郁闭度达一定程度以后,种间竞争加剧,林内光照弱,幼小个体退出竞争,林地凋落量增加;竞争自疏后,林地光照、土壤水分条件得到一定程度改善,凋落物分解速率加快,但凋落物以针叶为主,分解归还仍十分缓慢,故此阶段土壤肥力虽得到一定程度恢复,但速度极慢^[18,21-23]。所以,当人工油松林生长到一定阶段,通过外部输入养分,对于提高土壤肥力,增加生物生产力具有十分积极的意义。

表 4 子午岭油松林林下植被层、凋落物层和土壤层营养元素的积累量

Table 4 Nutrient element accumulation in forest floor, litterfalls and soil layers in *Pinus tabulaeformis* forest in ZiWuling Mountain

林分类型 Forest types	层 次 Layers	营养元素积累量 Nutrient element accumulation (kg·hm ⁻²)					
		N	P	K	Ca	Mg	合计 Total
I	林下植被层 Forest floor layer	2.36	0.48	2.55	1.98	0.59	7.96
	凋落物层 Litterfalls layer	34.30	1.54	16.32	21.89	2.89	76.94
	土壤层(0~60cm) Soil layer	4786.254	757.153	3015.425	7214.361	1124.168	16897.361
II	林下植被层 Forest floor layer	10.53	1.30	12.97	8.49	1.58	34.87
	凋落物层 Litterfalls layer	198.52	8.81	102.26	126.56	35.63	471.78
	土壤层(0~60cm) Soil layer	5698.124	847.192	3208.724	8114.361	1231.158	19099.559
III	林下植被层 Forest floor layer	6.73	0.49	3.23	2.68	1.59	14.72
	凋落物层 Litterfalls layer	134.19	9.75	98.72	120.13	33.72	396.51
	土壤层(0~60cm) Soil layer	3967.254	717.154	2915.425	6703.361	957.138	15260.332
IV	林下植被层 Forest floor layer	5.48	0.36	2.56	3.33	0.94	12.67
	凋落物层 Litterfalls layer	144.29	10.53	96.98	148.67	34.86	435.33
	土壤层(0~60cm) Soil layer	5489.134	812.252	3008.754	7965.361	1131.168	18406.669

从油松人工林营养元素分配特点来看,采伐利用树干所造成的养分输出占 28.60%~32.97%,对林分养分循环和林地生产力的影响相对较大,应通过实施去皮、截梢、打枝等措施,以维持林分养分平衡和发挥林地持久的生产力。由于油松人工林林下植物稀少,因而灌木层和草本层无论在生物量,还是在营养元素积累量上所占比例极小。同时,由于该区气候干燥、降水量小,从而使林地死地被物得到有效保护,所以死地被物层积累的营养元素也占相当比例。

2.3 油松林地上各组分养分的年积累量

油松地上部分养分年积累量以 30 龄人工林最高(表 5),随林龄的增加,养分年积累量随之减低,即 II> III> IV> I。各组分养分的年积累量总的变化趋势为:针叶>树枝>根系>树皮>树干。同一组分各养分年积累量与各组分养分贮量变化顺序基本一致,即 10 年生幼林为 N>Ca>K>P>Mg,人工成熟纯林 Ca>N>K>P>Mg,天然林与人工成熟林相似。据研究,该区的人工油松林在抚育后 10~30a 间有两个生长高峰,分

别在 11~12a 和 25~26a,而材积蓄量以 16~23a 之间为最高。林龄达 30a 后,开始出现自疏现象,部分油松生长缓慢,直至死亡,从而影响了该时期油松的养分年积累量。

表 5 油松林各组分养分的年积累量

Table 5 Annual accumulation of nutrients in different components of *Pinus tabulaeformis* forests

林分类型 Forest types	组 分 Components	年生长量 Annual biomass ($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$)	营养元素含量 Nutrient element contents ($kg \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$)					
			N	P	K	Ca	Mg	合计 Total
I	针叶 Needles	0.261	3.184	0.379	1.047	0.551	0.138	5.298
	树枝 Branches	0.217	1.239	0.273	0.864	0.510	0.061	2.947
	树皮 Bark	0.379	0.595	0.307	0.235	0.235	0.015	1.387
	树干 Bole	0.133	0.888	0.138	0.257	0.314	0.047	1.644
	根系 Roots	0.267	0.854	0.182	0.347	0.339	0.083	1.805
	合计 Total	1.257	6.761	1.279	2.749	1.949	0.344	13.081
II	针叶 Needles	0.408	4.419	0.501	2.426	2.503	0.473	10.322
	树枝 Branches	0.422	1.666	0.245	1.801	1.965	0.312	5.988
	树皮 Bark	1.186	1.103	0.119	0.984	1.001	0.107	3.321
	树干 Bole	0.281	1.022	0.115	0.679	1.044	0.208	3.068
	根系 Roots	0.464	1.285	0.199	1.289	1.192	0.260	4.227
	合计 Total	2.760	9.495	1.179	7.180	7.713	1.359	26.925
III	针叶 Needles	0.238	2.222	0.298	1.488	1.407	0.277	5.691
	树枝 Branches	0.286	0.581	0.140	0.536	1.300	0.198	2.756
	树皮 Bark	1.073	0.815	0.107	0.429	0.923	0.118	2.392
	树干 Bole	0.207	0.559	0.091	0.568	0.707	0.114	2.039
	根系 Roots	0.453	0.946	0.213	1.086	1.009	0.258	3.512
	合计 Total	2.257	5.124	0.849	4.106	5.345	0.964	16.389
IV	针叶 Needles	0.202	2.042	0.249	1.078	1.389	0.226	4.985
	树枝 Branches	0.238	0.877	0.219	0.727	0.732	0.143	2.696
	树皮 Bark	0.966	0.879	0.135	0.551	0.840	0.077	2.483
	树干 Bole	0.189	0.544	0.129	0.496	0.648	0.148	1.964
	根系 Roots	0.409	1.109	0.274	0.851	1.097	0.291	3.621
	合计 Total	2.004	5.450	1.007	3.703	4.705	0.884	15.749

2.4 油松林地主要养分的生物循环

营养元素的生物循环包括植物根系从土壤中吸收各种营养元素,将一部分用于构成植物体而存留下来,同时将另一部分元素通过凋落物、分泌物及雨水淋洗归还给土壤。营养元素的循环特征是树种特性、生境,特别是气候和土壤共同作用的结果^[11,21~24]。天然油松林的养分吸收量、归还量均明显大于人工油松林。人工林随着抚育林龄的增加,吸收和存留量先升后降,而归还量随林龄的增加而增加(表 6),这也是导致林分生长后期地上部分养分所占比例下降的主要原因之一。

吸收系数、利用系数及循环系数是森林生态系统养分循环的重要特征。吸收系数是指单位时间、单位面积植物所吸收的某种元素的量与土壤中相应元素总量之比,其大小与土壤中元素的贮存量及植物体对各元素的需求量有关。总趋势是随林龄的增加而增大,但不同元素之间存在差异(表 6)。利用系数为单位时间、单位面积植物所吸收的某种元素的量与存在于植物现存量中相应元素总量之比,反映生态系统元素存贮速率的大小。人工油松林的利用系数随林龄的增加而降低,可能与吸收量增加而有较少的归还量使贮量增加得快有关,天然油松林的利用系数与 50 龄人工林相似。

循环系数是单位时间、单位面积植物归还量与相应吸收量之比,反映了元素在循环过程中的存留量大小,循环系数越大,表明元素循环的速率越快,系统中存留量的比例就越小,而流动性越大,利用率越高。对 N、P、K 的循环系数以随林龄的增加先升后降,而 Ca、Mg 相反,天然油松林循环系数高于 50 龄人工油松林。

人工油松林随林龄的增加,早期自身养分利用率低,但其归还率快,周转期短,有利于林地生产力维持。

林分到达成熟期,养分的周转期长,归还给林地的养分速率慢,更多的关注自身的生长,更多的消耗林地的养分。因此,人工油松林到达成熟期后要通过人为措施,如采伐利用或加快其演替速度来恢复地带性的稳定群落,以达到维持林地持久的生产力。

表 6 不同油松林地主要营养元素的生物循环

Table 6 Biologic cycling of nutrients in different components of <i>Pinus tabulaeformis</i> forest							
项目 Items	林型 Stands	N	P	K	Ca	Mg	合计 Total
吸收量 Absorption(kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	I	19.011	2.489	5.889	18.399	5.294	51.201
	II	34.705	3.209	23.96	26.863	5.299	93.915
	III	18.064	1.969	8.266	43.915	15.414	87.629
	IV	27.295	2.527	9.333	52.625	13.144	104.919
归还量 Return(kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	I	12.254	1.211	3.144	16.451	4.952	38.121
	II	25.211	2.034	16.782	19.155	3.944	66.994
	III	12.941	1.122	4.164	38.575	14.451	71.241
	IV	21.844	1.521	5.637	47.928	12.265	89.172
存留量 Retention(kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	I	6.761	1.279	2.749	1.949	0.344	13.081
	II	9.495	1.179	7.180	7.713	1.359	26.925
	III	5.124	0.849	4.106	5.345	0.964	16.389
	IV	5.450	1.007	3.703	4.705	0.884	15.749
吸收系数 Absorption coefficient	I	0.0039	0.0033	0.0020	0.0026	0.0047	0.0030
	II	0.0061	0.0038	0.0075	0.0033	0.0043	0.0049
	III	0.0046	0.0027	0.0028	0.0066	0.0016	0.0057
	IV	0.0050	0.0031	0.0031	0.0066	0.0116	0.0057
利用系数 Utilization coefficient	I	0.281	0.195	0.214	0.944	1.541	0.391
	II	0.122	0.091	0.111	0.126	0.130	0.116
	III	0.071	0.046	0.040	0.164	0.320	0.107
	IV	0.072	0.036	0.159	0.162	0.212	0.095
循环系数 Cycling coefficient	I	0.644	0.486	0.533	0.894	0.935	0.744
	II	0.726	0.633	0.700	0.713	0.744	0.713
	III	0.716	0.567	0.503	0.878	0.934	0.813
	IV	0.800	0.602	0.603	0.911	0.933	0.850

3 结论

- 3.1 同一油松林地各组分养分含量的变化趋势为:针叶>树枝>树皮>树根>树干。同一油松林地上部分的养分为在针叶、树枝、树干和凋落物中各养分呈:Ca>N>K>Mg>P(林型I的针叶、枝干和林型IV的树枝N含量较其它元素含量高),而在土壤中各养分呈:Ca>K>Mg>N>P。充分体现了N在建造植物体中的重要作用,是森林生长的主要限制因子。各林型间植物体养分含量,在人工油松中,地上各组分N含量随着抚育林龄的增加而降低,可能与人工成熟纯林内物种单一,凋落物分解难度加大,林内小生境恶化,土壤中氮含量降低有关。不同林型内各养分含量因林龄的不同而有差异。
- 3.2 油松林生态系统中养分贮量以30a人工林最高,乔木层养分量占总贮量的0.76%~5.52%,林下植被层和凋落物层的养分贮量分别占系统总贮量的0.05%~0.17%和0.38%~3.48%。人工油松林随着抚育林龄的增加,贮量先升后降,林龄达到30a时养分贮量最大,50a时,养分贮量大大降低。其中N素衰减较其它养分快(30龄油松林是50龄油松林的3倍),主要原因可能为人工油松林达到成熟林后,凋落物这一重要归还土壤养分途径受阻,凋落量减少,且林内小生境恶化,凋落物分解难。
- 3.3 油松林地上部分养分贮量主要集中在针叶,且人工油松林随着抚育林龄的增加,针叶不但贮量增加而且占地上各组分总贮量比例也增大,树枝和树干只是绝对贮量增加,但所占地地上总贮量的比例下降。
- 3.4 油松林地上部分养分的年积累量以30a人工林最高,变化趋势为II>III>IV>I。各组分养分的年积累量总的变化趋势为:针叶>树枝>根系>树皮>树干。同一组分各养分年积累量与各组分养分贮量变化顺序基本一致,即10年生幼林为N>Ca>K>P>Mg,人工成熟纯林Ca>N>K>P>Mg,天然林与人工成熟林

相似。

3.5 天然林的吸收、存留量明显高于人工油松林,人工油松林随着抚育林龄的增加,吸收量和归还量增大,但存留量先增后降。各林地油松利用系数为:Ca > Mg > N > K > P,但同一养分利用率,油松人工林随着林龄的增加而降低。天然油松林与人工成熟油松林的利用系数和周转期相似,人工油松林随着抚育林龄的增加,循环系数先增后降,而周转期增长,各养分周转期顺序为 P > K > Mg > N > Ca,表明 N, Ca 是油松林生态系统中最活跃的元素, P 是最不活跃元素之一。

林地土壤有机质主要来源于凋落物的分解,并受其分解速率的控制,解决当前人工成熟林地土壤退化的主要措施应为林地凋落物的分解创造条件,即因地制宜地对成熟人工林进行抚育间伐,改善林地微环境。在该区域造林应尽量避免营造针叶纯林,特别是密度过大的针叶纯林,建议把生物循环快的阔叶林与针叶林进行混交。

References:

- [1] Zhu Z C. Features of vegetation zones in Qinling Mountain and its northern loess area. *Scientia Geographica Sinica*, 1991, 11(2):157 ~ 163.
- [2] Cheng J M, Wan H E. Vegetation construction and soil and water conservation in the Loess Plateau of China. Beijing: Chinese Forestry Press, 2002.
- [3] Chen Y M, Liang Y M, Cheng J M. The zonal character of vegetation construction on Loess Plateau. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, (3):339 ~ 345.
- [4] Yang W Z, Tian J L. Essential exploration of soil aridization in Loess Plateau. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(1):1 ~ 6.
- [5] Li Y Y, Shao M A. Climatic change, vegetation evolution and low moisture layer of soil on the Loess Plateau. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2001, 15(1):72 ~ 77.
- [6] Zhang X B, Guo X Q, Zhou T L, *et al.* Floristic analysis of seed plants in Ziwoing forest region. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2004, 24(2):267 ~ 274.
- [7] Li Y Y, Shao M A. The change of plant diversity during natural recovery process of vegetation in Ziwoing area. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(2):252 ~ 260.
- [8] Zou H Y, Liu G. B, Wang H S. The vegetation development in North Ziwoing forest region in last fifty years. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2002, 22(1):1 ~ 8.
- [9] Wu G, Feng Z W. Study on the social characteristics and biomass of the *Pinus tabulaeformis* forest systems in China. *Acta Ecologica Sinica*, 1994, 14(4):415 ~ 422.
- [10] Chen Y M, Wu Q X, Liu X D, *et al.* Related analysis between the growth of Chinese Pine and climatic factors in loess hilly region. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1996, 16(2):38 ~ 42.
- [11] Yan C R, Chen L Z, Huang J H, *et al.* A study on nutrient cycling of pine stands in eastern part of China. *Acta Phytocologica Sinica*, 1999, 23(4):351 ~ 360.
- [12] Nie D P. Biological cycling of the nutrient element in forest ecosystems. *Forest Research*, 1991, 4(4):435 ~ 440.
- [13] Wan G H. Plant traits and soil chemical variable during a secondary vegetation succession in abandoned fields on the Loess Plateau. *Acta Botanica Sinica*, 2002, 44(8):990 ~ 998.
- [14] Liu G. Q, Tu X N, Zhao S D, *et al.* Distributional characteristics on biomass and nutrient elements of *Pine-Quercus liaotungensis* forest in MT. Qinling. *Scientia Silvae Sinica*, 2001, 37(1):28 ~ 36.
- [15] Pan X Y, Liu S Q, Liu Q, *et al.* Degradation and control of soil organic matter and nutrient pool under subalpine spruce plantation in Western. Sichuan. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(1):126 ~ 133.
- [16] Zhao H Y, Wu Q X, Liu G B. Studies on soil and water conservation function of litter in Chinese pine stand on Loess Plateau. *Scientia Silvae Sinicae*, 2003, 39(1):168 ~ 172.
- [17] Zhao H Y, Wu Q X, Chen Y M. Accumulation effects on function of soil and water conservation in artificial Chinese pine forest system. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(4):41 ~ 43.
- [18] Zhang Y, Wang Y K, Wu Q X. Comparison of litter fall and its process between some forest types in Loess Plateau. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(5):91 ~ 94.
- [19] Gao J R, Xiao B B. Nutrient distribution and accumulation pattern of Chinese pine plantations in Qiaoshan forested region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(5):667 ~ 671.
- [20] Chen L Z, Hu Y H, Kong F Z, *et al.* The chemical elements of planted forest of *Pinus tabulaeformis*. *Acta Botanica Sinica*, 1987, 23(3):392 ~ 398.

- [21] Mo J M, Sandra B, Kong G H. Nutrient distribution and cycling of a Masson's pine planted forest in Dinghushan. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(5): 635 ~ 640.
- [22] Tu M Z, Yao W H, Wen H, *et al.* Characteristics of litter in evergreen broadleaved forest of the Dinghushan Mountain. *Acta Pedologica Sinica*, 1993, 30 (1): 34 ~ 42.
- [23] Yang Y S, Lin P, Guo J F, *et al.* Litter production, nutrient return and leaf-litter decomposition in natural and monoculture plantation forests of *Castunopsis leawakamii* in subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(7): 1278 ~ 1289.
- [24] Jing S L. Chemical properties of litterfall of conifer forest in Huangbei. *Chinese Journal of Ecology*, 1991, 10(1): 24 ~ 29.

参考文献:

- [1] 朱志诚. 秦岭及其以北黄土区植被地带性特征. *地理科学*, 1991, 11(2): 157 ~ 163.
- [2] 程积民, 万惠娥著. 中国黄土高原植被建设与水土保持. 北京: 中国林业出版社, 2002.
- [3] 陈云明, 梁一民, 程积民. 黄土高原林草植被建设中的地带性特征. *植物生态学报*, 2002, 26(3): 339 ~ 345.
- [4] 杨文治, 田均良. 黄土高原土壤干燥化问题探源. *土壤学报*, 2004, 41(1): 1 ~ 6.
- [5] 李裕元, 邵明安. 黄土高原气候变迁、植被演替与土壤干层的现成. *干旱区资源与环境*, 2001, 15(1): 72 ~ 77.
- [6] 张希彪, 郭小强, 周天林, 等. 子午岭种子植物区系分析. *西北植物学报*, 2004, 24(2): 267 ~ 274.
- [7] 李裕元, 邵明安. 子午岭植被自然恢复过程中植物多样性的变化. *生态学报*, 2004, 24(2): 253 ~ 260.
- [8] 邹厚远, 刘国彬, 王晗生. 子午岭林区北部近 50 年植被的变化发展. *西北植物学报*, 2002, 22(1): 1 ~ 8.
- [9] 吴刚, 冯宗炜. 中国油松林群落特征及生物量的研究. *生态学报*, 1994, 14(4): 415 ~ 422.
- [10] 陈云明, 吴钦孝, 刘向东, 等. 黄土丘陵区油松生长与气候因子相关分析. *水土保持通报*, 1996, 16(2): 38 ~ 42.
- [11] 严昌荣, 陈灵芝, 黄建辉, 等. 中国东部主要松林营养元素循环的比较研究. *植物生态学报*, 1999, 23(4): 351 ~ 360.
- [12] 聂道平. 森林生态系统营养元素的生物循环. *林业科学研究*, 1993, 30(1): 34 ~ 42.
- [13] 王国宏. 黄土高原自然植被演替过程中的植物特征与土壤元素动态. *植物学报*, 2002, 44(8): 990 ~ 998.
- [14] 刘广全, 土小宁, 赵士洞. 秦岭松栎林带生物量及营养元素的生物循环特征研究. *林业科学*, 2001, 37(1): 28 ~ 36.
- [15] 庞学勇, 刘世全, 刘庆, 等. 川西亚高山人工云杉林地有机物和养分库的退化与调控. *土壤学报*, 2004, 41(1): 126 ~ 133.
- [16] 赵鸿雁, 吴钦孝, 刘国彬. 黄土高原人工油松林枯枝落叶层的水土保持功能研究. *林业科学*, 2003, 39(1): 168 ~ 172.
- [17] 赵鸿雁, 吴钦孝, 陈云明. 人工油松林系统水土保持功能的叠加效应. *水土保持学报*, 2001, 15(4): 41 ~ 43.
- [18] 张翼, 汪有科, 吴钦孝. 黄土高原几种主要森林类型的凋落及其过程比较研究. *水土保持学报*, 2001, 15(5): 91 ~ 94.
- [19] 高甲荣, 肖斌. 桥山林区油松人工林营养元素分配与积累的研究. *应用生态学报*, 2001, 12(5): 667 ~ 671.
- [20] 陈灵芝, 胡肆慧, 孔繁志, 等. 油松林的化学元素. *植物学报*, 1987, 23(3): 392 ~ 398.
- [21] 莫江明, Sandra Brown, 孔国辉, 等. 鼎湖山马尾松林营养元素的分布和生物循环特征. *生态学报*, 1999, 19(5): 635 ~ 640.
- [22] 屠梦照, 姚文华, 翁轰. 鼎湖山常绿阔叶林凋落物特性. *土壤学报*, 1993, 30(1): 34 ~ 42.
- [23] 杨玉盛, 林鹏, 郭剑芬. 格氏栲天然林与人工林凋落物数量、养分归还及凋落叶分解. *生态学报*, 2003, 23(7): 1278 ~ 1289.
- [24] 金少麟. 华北地区针叶林下凋落物层化学性质的研究. *生态学杂志*, 1991, 10(1): 24 ~ 29.