

# 黄土丘陵区华北落叶松人工林生态系统 生物量与养分循环特征

王彬, 魏天兴, 刘钊

(北京林业大学 水土保持学院, 北京林业大学 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站,  
水土保持国家林业局重点实验室(北京林业大学), 北京 100083)

**摘要:**通过样地调查观测和室内样品分析,对位于山西吉县的23年生华北落叶松人工林生态系统中13种元素的循环特征进行研究。测算得到研究区域人工林生态系统的生物量在各器官的空间分布,结合林木各器官养分含量,得出养分元素在空间变异上的积累与分布;测算四大分室(林木、土壤、枯落物和大气)中其余分室的养分含量和养分积累与分布,得到养分循环过程中华北落叶松人工林养分年归还量 $134.719\text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,年存留量 $53.409\text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 和年吸收量 $188.129\text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ;最后综合上述的各分室养分循环状况,得出反映该森林生态系统的养分生物循环特征的参数和指标。研究区华北落叶松人工林生态系统内N、P、K的循环系数均值(0.68),表明研究区生态系统循环速率较快;利用系数偏小,储存效率慢,土壤养分利用效率较高;养分元素通过林冠后均明显增加(林冠截留量 $142.1\text{ mm}$ ),并且对降水量( $587.8\text{ mm}$ )要求一般。较高的富集系数使其适应瘠薄自然环境,养分消耗量低。总体来看,华北落叶松是很有潜力的森林更新和荒山造林树种。

**关键词:**森林生态系统;养分循环特征;生物量;养分含量;积累与分配

中图分类号:S718.55

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)06-0045-07

## Characteristics of Nutrient Cycling and Ecosystem Structure of *Larix principis-rupprechtii* in Hilly Loess Plateau

WANG Bin, WEI Tianxing, LIU Zhao

(College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Jixian Forest Ecosystem

Observation and Experiment Station, China National Ecosystem Research Network, Key Laboratory of

State Forestry Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Cycling symbol of thirteen nutrient elements in ecosystem of 23-year-old plantation of *Larix principis-rupprechtii* in Jixian County, Shanxi Province was studied through survey of sample plots and indoor sample analysis. Spatial distribution of biomass in different organs of plantation ecosystem in the study area was measured, the accumulation and distribution of nutrient elements in spatial variation combining with organ nutrient content of trees were obtained; nutrient content and nutrient accumulation & distribution of other chambers of the four major chambers (forest, soil, litter and atmosphere) were measured to obtain annual nutrient return of *Larix principis-rupprechtii* plantation in nutrient cycling of  $134.719\text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ , annual storage of  $53.409\text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$  and annual absorption capacity of  $188.129\text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ; at last, in summary of nutrient cycling in above chambers, parameters and indicators reflecting characteristics of nutrient biological cycle of the forest ecosystem were obtained. Average cycle coefficient of N, P, K in plantation ecosystem of *Larix principis-rupprechtii* in the study area was 0.68, revealing that cycling of ecosystem in the study area was faster; utilization coefficient was small, storage efficiency was slow and soil nutrient use efficiency was higher; nutrient elements that passed through canopy significantly increased (canopy interception of  $142.1\text{ mm}$ ), with normal requirement on precipitation ( $587.8\text{ mm}$ ). Higher enrichment factor enabled it to adapt to barren environment with low nutrient consumption. As a whole, *Larix principis-rupprechtii* is of great potential for forest regeneration and afforestation.

收稿日期:2016-12-06

修回日期:2017-01-20

资助项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAD07B02);国家生态系统观测研究网络运行服务项目(2014-2015)

第一作者:王彬(1990—),男,甘肃甘南人,硕士研究生,主要从事生态环境地理学等方面的研究。E-mail:635901698@qq.com

通信作者:魏天兴(1969—),男,甘肃庆阳人,教授,博士生导师,主要从事流域自然地理学及林业生态工程学研究。E-mail:weix@bjfu.edu.cn

**Keywords:** forest ecosystem; nutrient cycling characteristics; biomass; nutrient content; accumulation and distribution

森林生态系统的养分循环状况直接决定着林分生产力的变化,有着重要的研究价值。从19世纪40年代以来吸引着中外学者对其展开了大量研究工作。人工林作为特殊的森林生态系统,对其的营造是人类改善生态环境和发展经济林的重要手段。目前我国森林生态系统养分循环的研究主要集中在人工林生态系统,已取得丰富成果,近几年来,为从整体上完善养分循环动态过程的研究,纵向上不仅关注植被、土壤、枯落物之间的养分循环,更完善了雨水淋溶过程中的养分循环研究<sup>[1-2]</sup>,同时横向上对微量元素的养分循环也有更多研究<sup>[3-5]</sup>。华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)主要分布在山西、河北两省,是我国重要的速生用材林树种之一,具有生长快、水土保持效果好等优点。在维持区域景观多样性、水源涵养,以及维持生态平衡等方面发挥着积极作用。黄土丘陵区是治理生态环境的重点区域,水土流失严重、植被覆盖率低。在治理的过程中经常采用营造人工林的方式保持水土。山西吉县为典型黄土丘陵区,已经通过对人工林的营造,总体上有效的改善了土壤养分减少和水土流失的状况。目前黄土高原人工纯林生态系统养分循环的研究工作,取得了明显的进展<sup>[6-7]</sup>,但研究对象多为人工刺槐林和人工油松林的养分元素积累分布和生物循环,而关于黄土丘陵区华北落叶松人工林纯林生态系统的养分循环很少有学者做过研究。

因此山西吉县森林生态系统国家科学观测研究站对山西吉县的华北落叶松人工林生态系统进行了长期定位观测研究。本研究研究对象为山西吉县的23 a生华北落叶松人工林生态系统,对植被、凋落物、

土壤以及降水淋溶各层次中养分元素的循环特征展开研究。分析黄土丘陵区华北落叶松人工林生态系统的生产力状况及营养元素的空间分布积累和循环规律。为研究华北落叶松在山西西南部的生态适应性提供科学数据,对如何保证森林土壤肥力、制定森林经营方案提供理论支撑,对促进黄土高原丘陵区人工林结构的调整具有现实意义。

## 1 研究地概况

研究地点位于黄土高原山西省临汾市吉县屯里镇金岗岭,北纬36°06′59.35″,东经111°02′35.81″,海拔1 510~1 580 m。拥有着黄土高原气候的典型特征,由于地形和纬、经度的影响,多为半旱生落叶阔叶林地带。年平均降水量为575.9 mm,年际、年内变化大,6—8月份降水量占全年总降水量的80.6%,降水热同期。平均日照时长2 563.8 h,气温日较差、年较差大,年平均温度为10℃,年平均无霜期约为170 d。该片区为典型的黄土残塬、梁峁侵蚀地形<sup>[8]</sup>,地貌类型复杂,以黄土丘陵为主,土壤以碳酸盐褐土为主,pH值约为7.85。植被类型属于暖温带落叶阔叶林,调查区为1986年营造的人工华北落叶松纯林(表1)。林下植被中,乔木普遍低矮未成材,有五角枫(*Acer mono*),辽东栎(*Quercus wutaishansea*),山杏(*Armeniaca sibirica*)等;灌木有金银忍冬(*Lonicera maackii*),虎榛子(*Ostryopsis davidiana*),连翘(*Forsythia suspensa*),枸杞(*Lycium chinense*),绣线菊(*Spiraea Salicifolia*)等;草本有黄花蒿(*Artemisia annua*)等,盖度为7.23%。

表1 人工落叶松林分特征和生物量

胸径/ cm	树高/ m	林龄/ a	密度/ (株·hm <sup>-2</sup> )	乔木 郁闭度	生物量/(t·hm <sup>-2</sup> )				
					乔木	灌木	草本	凋落物	总量
13.61	10.8	23	1937	0.63	131.888	1.621	0.106	3.190	136.805

## 2 研究方法

### 2.1 生态系统生物量调查

在研究区选取有代表性的1 hm<sup>2</sup>正方形地块,其中沿对角线设置18个10 m×10 m样方对林木每木检尺,依据平均树高和胸径,择取平均标准木。乔木层地上生物量的实测使用Monsi分层切割法;根系生物量使用全挖法<sup>[9]</sup>;进行树干解析<sup>[10]</sup>;计算乔木层生物量回归方程的估算参数;测定灌木层枝、叶及

根的生物量;设置1 m×1 m的18个样方,测定草本层地上、地下部分的生物量;在标准地内随机布设0.5 m×0.5 m的凋落物筐6个,按月收集落枝、落叶、落皮,测定乔木层年均凋落量<sup>[11]</sup>。

华北落叶松人工林的单株生物量( $w$ )与其胸径平方和树高的乘积( $D^2H$ )之间有幂函数相关关系<sup>[12]</sup>,其相应的线性回归方程为: $\ln(w) = b_0 + b_1 \ln(D^2H)$ 。代入18块样地标准木的生物量和树高、胸径数据进行拟合做曲线回归分析确定华北落叶松人工林各器官的

生物量模型的估算参数(表 2)。

2.2 降水观测

林外降水由林外气象站的降水量筒和自计降水量计观测;林内降水用 18 个标准降水量筒随机布置在标准地内进行观测;测定树干茎流量时,先选取不同径级的 3 株华北落叶松<sup>[13]</sup>,然后剖开聚乙烯管(直径 1 cm),将管螺旋 2 周用钉固定于树干下方部位。

表 2 华北落叶松人工林生物量的估算模型

器官	系数		相关 系数 $R^2$	估计标准 误差	显著性
	$b_0$	$b_1$			
树干	9.435	0.171	0.330	0.018	<0.001
树皮	1.092	0.250	0.899	0.034	<0.001
树叶	0.006	0.866	0.856	0.142	<0.001
树果	6.90 E-05	0.789	0.888	0.113	<0.001
树枝	0.458	0.42	0.776	0.09	<0.001
树根	0.409	0.43	0.967	0.032	<0.001

注:显著性水平( $\alpha=0.01$ )。

采样完毕送回实验室进行分析,参照国家标准水质采样样品的保存和管理技术规定(GB12999—91)。

2.3 分析样品的采集

植物样在生产力测定过程中采取。土壤样在标准地内“S”型布 7 个点分别挖取,采用“环刀法”测土壤容重<sup>[14]</sup>,分别采取 0—10 cm,10—20 cm,20—40 cm,40—60 cm,60—80 cm 和 80—100 cm 共 6 个层次;降水样在每月降水量观测同时采取。

2.4 样品化学分析

收集的各类样品经过预处理后,用 K1100 型全自动凯氏定氮仪测定全 N 含量,用钼锑抗比色法测定全 P 含量<sup>[15]</sup>,用 ProdigyXP 型全谱直读 ICP 光谱仪测定 K,Ca,Mg,Na,Fe,Cu,Mn,Cr,Ni,Cd,Zn 含量。各营养元素测定在北京林业大学水土保持学院重点实验室完成。

2.5 数据处理

使用 Excel 2016 和 SPSS 19.0 完成数据统计分析。做曲线回归分析确定华北落叶松人工林各器官的生物量模型的估算参数;对研究区华北落叶松人工林生态系统内,植被、土壤、凋落物、降水的不同组分之间养分含量的差异,分别采用单因素方差分析(one-way ANOVA)进行对照比较,采用最小显著差异法(LSD)进行多重比较,以及 Duncan 法进行多组样本间差异显著性分析(结果用字母表示),显著性水平  $\alpha=0.05$ 。

3 结果与分析

3.1 华北落叶松人工林植被养分特征

3.1.1 落叶松养分含量 植物中的养分元素含量是

长期演化的结果,也受生境中的土壤肥力影响,是判断植物生长发育状况及元素分布的重要依据。华北落叶松人工林植被从上至下,养分元素浓度(表 3)依次递增(乔木层<灌木层<草本层)。乔木层各器官中,树枝末端的树叶是光合、呼吸作用等重要生理活动的主要器官,树枝为树叶与树果不断运输着养分,所以枝、果、叶中的元素含量要高于其他各器官;树干由于生理代谢相对较弱,养分含量最低。

乔、灌、草各层次中大量元素含量排列顺序基本一致,为  $\text{Ca}>\text{N}>\text{K}>\text{Mg}>\text{P}$ ,特殊的有乔木层树叶、树枝和树果中  $\text{N}>\text{Ca}$ ,树干中  $\text{K}>\text{Ca}$ ,树叶中  $\text{Mg}<\text{K}$ 。各层次中微量元素含量排列顺序基本一致为  $\text{Fe}>\text{Na}>\text{Mn}>\text{Zn}>\text{Cr}>\text{Cu}>\text{Ni}>\text{Cd}$ ,特殊的树叶中  $\text{Ni}<\text{Cd}$ ,树皮中  $\text{Na}>\text{Fe}$ ,树干中  $\text{Cu}>\text{Cr}$ 。光合作用和叶绿素的构成必须有 Zn,Fe 和 Mn 的参加,Na 是参与合成细胞膜的关键养分元素,因此它们的浓度均较高;Cu,Ni 是过量后对植物体有害的元素,含量很低均小于 0.04 mg/g。

草本和灌木中 P,K,Mg,Ni,Cd 含量,树皮和树根中 N,P,Mg,Mn,Cr,Ni 含量,树根、灌木和树皮中的 N,Ni 含量,树皮、树果和树根中的 P 含量,树皮、树干、树果和灌木中的 K 含量,树枝和灌木中的 Ca,Cr 含量,树果、树根和树皮中的 Mg,Na 含量,树干、树枝和树皮中的 Fe,Mn 含量,树枝、树果和草本中的 Cu 含量,树叶和树枝中的 Cd 含量,树果和树叶中的 Zn,均无显著性差异( $p>0.05$ )。

3.1.2 落叶松养分积累与分布 在森林生态系统中,元素的积累和分布与各层次元素含量以及生物量增长紧密相关,是林分与生境相互影响的结果<sup>[3]</sup>。养分含量(mg/g)与生物量( $\text{t}/\text{hm}^2$ )相乘可得养分积累与分布( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )。在华北落叶松人工林植被中,乔木层是最活跃、最重要的亚系统,养分积累量远大于灌木层和草本层。

3.2 华北落叶松人工林土壤养分特征

3.2.1 土壤元素含量 见表 4,研究区土壤中大量元素中 K 在土壤中的含量远高于其他几种元素,平均含量达到 12.441 mg/g,P 的平均含量最小,为 0.371 mg/g。Mg 的含量基本不受土层深度的影响。N 的含量随土层深度的增加而减小,变化稳定,在表层的含量最高,达到 1.727 mg/g,在土层深度 80 cm 到 100 cm 处,N 的含量减小为 0.449 mg/g,这可能是枯落物分解的结果。P 在土层深度 10 cm 到 40 cm 含量突然快速降低,这可能与植被根系吸收有关。

土壤中微量元素中 Fe 的含量最高,Zn 次之,Cd 最低。与马尾松人工林<sup>[4]</sup>和杨树人工林<sup>[5]</sup>土壤微量元素

含量规律稍有差异(Fe 的含量最高,Mn 次之,Cd 最低)。其中 Fe 的含量要远高于其他集中微量元素,约是 Zn 含量的 20 倍,甚至高于各大量元素的总和。各微量元素含量在土壤层层呈垂直分布,除 Zn 外含量均减少,表明这些元素在土壤中被淋溶而向下迁移。

在各剖面中,除 60—80 cm 和 80—100 cm 外其余层次 N 含量,除 20—40 cm 和 80—100 cm 外其余

层次 P 含量,均显著差异( $p<0.05$ );20—40 cm,40—60 cm,60—80 cm,80—100 cm 的 K,Fe,Cu 含量,0—10 cm,10—20 cm,20—40 cm,40—60 cm,60—80 cm 的 Ca 含量,所有层次的 Mg,Cr,10—20 cm,20—40 cm,60—80 cm,80—100 cm 的 Na 含量,40—60 cm,60—80 cm 的 Mn,Ni,Cd,除 60—80 cm 外其余层次的 Zn,均无显著差异( $p>0.05$ )。

表 3 华北落叶松人工林植被养分含量

项目	乔木						灌木	草本
	树干	树皮	树叶	树果	树枝	树根		
生物量/(t·hm <sup>-2</sup> )	66.805	14.072	8.214	0.055	21.873	20.869	1.621	0.106
大量元素/ (mg·g <sup>-1</sup> )	N	1.01±0.08d	3.58±0.33c	10.06±0.22a	4.33±0.43b	4.35±0.51b	3.31±0.33c	4.29±0.39b
	P	0.14±0.01e	0.64±0.04d	2.51±0.50a	0.81±0.09cd	1.06±0.14b	0.83±0.09cd	1.06±0.13b
	K	1.41±0.12d	1.19±0.08d	5.07±0.89a	2.00±0.16c	3.08±0.40b	2.03±0.22c	1.35±0.10d
	Ca	1.25±0.11f	4.73±0.35c	6.8±0.64a	2.79±0.16e	3.97±0.46d	3.47±0.41d	4.37±0.40cd
	Mg	0.31±0.01e	1.06±0.06cd	1.78±0.19a	0.99±0.11d	1.14±0.16c	1.02±0.08c	1.27±0.10b
	Na	41.33±1.26f	212.69±32.38b	278.58±20.06a	194.03±25.71b	211.82±32.01b	72.21±6.79e	126.98±20.53d
微量元素/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	Fe	115.36±22.80e	142.95±18.98e	276.79±40.41d	521.53±64.28a	120.41±16e	426.37±53.2b	252.39±38.95d
	Cu	18.23±5.16de	14.68±3.22e	36.8±2.84a	28.85±4.11bc	27.45±3.84c	32.96±5.32ab	21.59±3.89d
	Mn	79.36±29.59de	70.49±5.23de	136.39±15.7bc	194.19±41.14a	58.47±9.6e	88.94±12.77d	119.31±26.56c
	Cr	15.14±5.14d	37.86±5.92a	37.21±6.50ab	31.92±3.19bc	31.14±6.4c	33.45±4.26abc	29.64±3.98c
	Ni	0.81±0.24c	0.89±0.16c	0.090±0.02c	1.72±0.32b	9.11±1.60a	1.1±0.16c	0.83±0.13c
	Cd	0.31±0.11d	0.39±0.08d	0.66±0.08c	1.9±0.51a	0.86±0.32bc	0.93±0.19b	0.78±0.10bc
	Zn	20.81±5.75e	30.65±3.58d	82.97±9.76a	80.71±16.00a	67.29±12.80b	48.98±9.00c	47.89±6.79c

注:平均值±标准误,同一行不同小写字母表示各组分差异性显著( $p<0.05$ )。

表 4 华北落叶松土壤层养分含量

项目	土层/cm					
	0—10	10—20	20—40	40—60	60—80	80—100
容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	0.77	0.83	0.92	1.08	1.17	1.05
大量元素/ (mg·g <sup>-1</sup> )	N	1.73±0.07a	0.97±0.08b	0.82±0.12c	0.6±0.05d	0.51±0.08e
	P	0.68±0.05a	0.55±0.06b	0.33±0.04d	0.19±0.02e	0.42±0.05c
	K	13.30±1.35a	9.85±0.84b	13.38±2.20a	13.14±2.44a	11.33±1.87ab
	Ca	0.90±0.07ab	0.89±0.10ab	0.99±0.11a	0.90±0.11ab	0.93±0.11ab
	Mg	4.83±0.69a	4.30±0.05a	4.69±0.75a	4.40±0.88a	4.64±0.53a
	Na	1421.08±172.30a	941.32±117.74b	984.62±189.04b	1502.37±121.01a	969.34±122.73b
微量元素/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	Fe	23148.89±3253.11a	18778.21±2312.55b	23960.74±5275.69a	25449.48±2420.17a	24376.87±3068.24a
	Cu	36.71±23.21a	21.95±3.15b	25.87±3.54ab	24.99±2.48ab	23.75±6.34b
	Mn	819.77±116.00ab	620.37±73.58c	903.03±93.23a	759.13±113.70b	823.86±159.67ab
	Cr	104.76±25.13a	86.25±9.46a	85.47±15.47a	97.99±28.72a	96.33±26.32a
	Ni	31.63±4.83bc	25.32±4.20d	38.89±5.90a	30.73±3.41cd	32.44±6.58bc
	Cd	0.68±0.12c	1.81±0.53a	1.87±0.29a	1.27±0.24b	1.5±0.39ab
	Zn	1013.55±166.87ab	1140.73±443.54a	1198.11±150.25a	1159.72±343.91a	820.73±197.92b

注:平均值±标准误,同一行不同小写字母表示各组分差异性显著( $p<0.05$ )。

3.2.2 土壤元素的贮存与分配 土壤是森林生态系统养分循环的基础,养分的收支和调控以土壤为中心计量<sup>[16]</sup>。通常森林土壤元素贮量占据整个生态系统元素贮量的比例超过了 98%,是元素的巨大贮存库,其贮存量与土壤容重有直接联系。根据土壤剖面各个土层的容重、土壤中养分元素含量,可知

林地土壤总量为 10 050 t/hm<sup>2</sup>,土壤养分贮藏量为 465.196 t/hm<sup>2</sup>。

研究区土壤中大量元素和微量元素的贮藏量与土壤养分含量正相关。其中土壤全 Fe 总量 2.42%,低于全国平均值(3%)和世界平均值(3.8%),这与黄土地陵地区土壤以褐土为主有关<sup>[17]</sup>。

3.3 华北落叶松人工林凋落物养分含量及年凋落物养分归还量

凋落物中大量元素含量相比较植被层 P 含量降幅较大。因为枯枝落叶的部分养分元素经过淋溶分解等作用,早在凋落之前就发生了转移。凋落物层中微量元素含量相比较植被层 Zn 和 Cu 含量降幅较大。总体来说凋落物的养分含量与乔木层树叶的养分含量接近。这是因为人工林的灌木和草本稀少,凋落物主要来自于乔木层。即使落叶的养分元素已经大量转移,叶作为林木生理活动的关键器官养分浓度仍然较高,同时落叶也是凋落物养分归还的主体,木质化后的落枝、落皮合计仅占凋落总量的 40% 以下<sup>[18]</sup>。华北落叶松年凋落物养分归还量(表 5)在各组分中叶最大,占总归还量的 78.5%;其次为枝 16.6%,皮最小 4.9%。养分浓度较高的落皮,凋落量小于落枝。

表 5 年凋落物归还量

项目		叶	枝	皮和其他	合计
大量元素/ (kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	N	22.67±1.46	4.79±0.60	1.42±0.14	28.88
	P	2.81±0.27	0.59±0.08	0.18±0.02	3.58
	K	10.01±1.09	2.12±0.23	0.62±0.06	12.75
	Ca	11.19±2.79	2.37±0.11	0.7±0.06	14.25
	Mg	3.97±2.61	0.84±0.10	0.25±0.02	5.06
	Na	310.75±40.32	65.71±7.74	19.4±2.52	395.86
	Fe	611.31±104.56	129.27±11.96	38.16±3.60	778.74
微量元素/ (g·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	Cu	52.59±8.08	11.12±0.97	3.28±0.31	66.99
	Mn	316.51±42.34	66.93±10.64	19.76±1.83	403.2
	Cr	64.35±6.63	13.61±1.10	4.02±0.53	81.98
	Ni	2.5±0.38	0.53±0.53	0.16±0.01	3.19
	Cd	1.5±0.16	0.32±0.02	0.09±0.01	1.91
	Zn	15.5±2.30	3.28±0.72	0.97±0.13	19.74

注:平均值±标准误。

3.4 华北落叶松人工林降水养分含量及雨水淋溶养分归还量

大气降水过程是森林生态系统养分输入的主要途径,对林木养分元素有着吸收、吸附、淋洗和淋溶作用,林冠淋溶出的可溶性养分物质,被林木直接吸收,而不需要进行复杂的分解、转化。因此降水有利植被成长,并推进养分循环过程<sup>[2]</sup>。

研究区 2014 年 7 月—2015 年 7 月降水中的养分元素浓度(林外降水、穿透降水和树干茎流),在经过林冠位置后有较大变化。顶层枝、叶和树皮表面的灰尘颗粒以及叶表面的分泌物,被降水淋溶后形成了养分浓度较高的树干茎流。研究区林外降水的养分浓度皆低于穿透降水,树干茎流中的全部大量养分元素和 Cu,Mn 浓度均高于林外降水和穿透降水,其中变幅最大的 P(其次是 K,Ca),浓度分别是林外降水和穿透降水的 56,7 倍,林外降水和穿透降水中 P 浓度较低,大部分来源于大气尘埃,本身难以淋溶。

观测年份的大气降水量(林外降水)为 587.8 mm、穿透降水为 442.3 mm、树干茎流量为 3.5 mm,可知林冠截留量 142.1 mm。而林冠截留量中的养分即是雨水淋溶养分归还量。降水过程中的养分输入量大小为,穿透降水>林外降水>树干茎流。

3.5 华北落叶松人工林养分归还量、存留量和吸收量

森林生态系统中,养分元素在林木和土壤之间的流动,包括 3 个过程:吸收、存留和归还(吸收=存留+归还)<sup>[19]</sup>。土壤中贮藏的养分元素通过植被根系的吸收作用,部分被转移到植物体内存留下来,参与构建植物体,部分营养元素又以不同形式(淋溶作用、表面分泌物和凋落物)归还到土壤<sup>[20]</sup>。

表 6 降水养分元素输入量

项目		林外降水	穿透降水	树干茎流	淋溶归还量
大量元素/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	N	7.43±0.74	15.92±1.07	0.15±0.05	8.65
	P	0.51±0.02	3.32±0.17	0.17±0.04	2.98
	K	2.36±0.11	8.98±0.64	0.29±0.11	6.90
	Ca	2.9±0.27	34.29±2.49	0.45±0.14	31.84
	Mg	3.12±0.43	7.19±0.38	0.07±0.03	4.14
微量元素/ (g·hm <sup>-2</sup> )	Na	3240.61±156.09	14319.8±1028.79	14.21±4.33	11093.40
	Fe	1190.78±37.21	2590.64±199.71	13.92±3.28	1413.77
	Cu	7.81±0.24	90.21±4.71	0.98±0.37	83.37
	Mn	42.74±4.61	457.86±35.14	40.34±12.30	455.45
	Cr	2.26±0.36	92.41±8.13	0.04±0.02	90.20
	Ni	4.46±0.21	20.73±1.59	0.1±0.02	16.37
	Cd	1.36±0.08	5.36±0.40	0.04±0.01	4.03
	Zn	805.3±88.61	1580.5±103.69	9.17±3.38	784.36

注:平均值±标准误。

凋落物和雨水淋溶的养分归还量合计得出养分元素的总归还量为 134.719 kg/(hm<sup>2</sup>·a)。养分存留量是指乔木层各器官在单位时间(1 a)内积累的元素总量。

通过林木年增长的生物量与其养分浓度的的乘

积计算各元素总存留量为 53.409 kg/(hm<sup>2</sup>·a)。根据循环平衡公式,得华北落叶松人工林各元素吸收量之和为 188.129 kg/(hm<sup>2</sup>·a),其中以 N 最高,其次为 Ca。综合养分含量的结果,N,Ca 可作为指标,判断华北落叶松人工林生产力的衰退。

表 7 华北落叶松人工林养分归还量、存留量和吸收量

归还量/(kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )			存留量/(kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )						吸收量/	
年凋落物	雨水淋溶	合计	树干	树皮	树叶	树果	树枝	树根	合计	(kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )
66.264	68.455	134.719	12.800	7.168	9.667	0.029	13.435	10.311	53.409	188.129

3.6 华北落叶松人工林养分生物循环特征

利用系数<sup>[21]</sup>、周转期<sup>[22]</sup>、富集系数、循环系数<sup>[23]</sup>是森林生物循环的重要特征。华北落叶松人工林养分大量元素利用系数的排列顺序为 Ca>N>Mg>p>K,Ca 的利用系数最大,存储速率最快,微量元素利用系数为 Na>Zn>Fe>Mn>Cd>Ni>Cr>Cu。华北落叶松人工林养分大量元素中,除了 N 和 Ca 其他元素的周转期都超过了 10 a,K 周转期最高为 13.48 a,其利用效率也最高。微量元素中,Cu 周转期最高为 20.31 a,Na 的周转期最低为 1.25 a,Na 很

容易从不同层次中淋洗出来,移动性较高,因而具有较短的周转期。

研究区乔木层各器官的大量元素中对于土壤中 N 的富集强度最大,微量元素中对 Cu 的富集强度最大,而其他微量元素的富集系数均小于 0.35。其中对于 Fe 的富集系数各器官均小于 0.1,尽管各器官中微量元素含量最大的是 Fe,这是因为研究区土壤中全 Fe 含量是非常大的。各养分元素的循环系数均大于 0.4,说明研究区乔木层的养分元素循环效率较高,生长所消耗的土壤内营养元素较少。

表 8 华北落叶松人工林人工落叶松林养分生物循环特征

项目		归还量/ (kg · hm <sup>-2</sup> · a <sup>-1</sup> )	存留量/ (kg · hm <sup>-2</sup> · a <sup>-1</sup> )	吸收量/ (kg · hm <sup>-2</sup> · a <sup>-1</sup> )	林分贮存量/ (kg · hm <sup>-2</sup> )	土壤贮存量/ (kg · hm <sup>-2</sup> )	利用 系数	周转期/ a	富集 系数	循环 系数
大量元素	N	37.527	15.854	53.380	370.79	7076.76	0.14	9.88	3.64	0.70
	P	6.552	3.478	10.030	81.80	3613.66	0.12	12.48	1.61	0.65
	K	19.653	11.412	31.065	264.82	124764.96	0.12	13.48	0.16	0.63
	Ca	46.093	15.876	61.969	372.79	9084.14	0.17	8.09	3.01	0.74
	Mg	9.202	4.185	13.387	98.45	45729.27	0.14	10.7	0.16	0.69
	Na	11.489	0.617	12.106	14.42	11253.75	0.84	1.25	0.09	0.95
微量元素	Fe	2.193	1.024	3.217	24.00	243667.85	0.13	10.95	0.01	0.68
	Cu	0.150	0.131	0.282	3.06	257.58	0.09	20.31	0.86	0.53
	Mn	0.859	0.459	1.318	10.77	7387.43	0.12	12.54	0.11	0.65
	Cr	0.172	0.141	0.313	3.28	979.85	0.10	19.07	0.25	0.55
	Ni	0.020	0.013	0.032	0.29	336.67	0.11	14.89	0.06	0.61
	Cd	0.006	0.003	0.009	0.07	15.42	0.13	12.02	0.34	0.66
	Zn	0.804	0.217	1.022	5.09	11028.48	0.20	6.32	0.03	0.79

4 结 论

研究区华北落叶松人工林林地营养元素循环较快,土壤中养分利用率较高。循环系数即归还量与吸收量的比值,与生态系统养分循环的速率正相关,研究区华北落叶松人工林生态系统内 N,P,K 的循环系数均值(0.68),高于北京密云油松人工林生态系统<sup>[22]</sup>、贡嘎山常绿与落叶阔叶混交林和冷杉林生态系统<sup>[23]</sup>,介于海南岛山地雨林(0.82)和日本天然阔叶林(0.50)之间,表明研究区生态系统循环速率较快;利用系数越大,则表

明该养分的年贮存状况越好、贮存速率越大、生长越旺盛,利用效率越低,研究区华北落叶松人工林生态系统内 N,P,K 的利用系数均值(0.14),低于北京密云麻栎一侧柏人工混交林(0.19),各微量养分元素的利用系数都低于湘潭锰矿废弃地栎树人工林<sup>[3]</sup>,但总体高于同样位于蔡家川流域的人工刺槐林和人工油松林<sup>[6]</sup>,可知研究区利用系数偏小,储存效率慢,土壤养分利用效率较高;周转期解释了养分的贮存和释放规律,K 和 Cu 周转期最长,其利用效率也最高,Na 的周转期最低,很容易淋洗出来,移动性较高。

研究区年归还的养分占年吸收总量的 71.6%,其中凋落物归还部分占 49.2%,养分的归还过程较为活跃,吸收乏力,需要注意的是,华北落叶松的凋落量水平一般,但是积累量较大( $20\sim 28\text{ t/hm}^2$ ),大于阔叶红松林( $9.3\sim 16.1\text{ t/hm}^2$ ),加上研究区内的郁闭度(63.2%)较高、林龄(23 a)不是快速生长期,容易造成凋落物积累过多不利于微生物等进行分解过程,造成地力衰退,为了防止华北落叶松人工林生产力衰退,吸收过程中养分含量最高的 N, Ca 可作为指标,判断华北落叶松人工林生产力的衰退。人工林林地内雨水淋溶归还量大,占归还总量的 50.8%,养分元素通过林冠后均明显增加(林冠截留量 142.1 mm),并且对降水量(587.8 mm)要求一般。

因此,山西吉县的华北落叶松人工林具有较高的富集系数使其适应瘠薄自然环境,养分消耗量低,是适生于生态环境脆弱的晋西黄土丘陵区的生态经济型防护林树种。

致谢:感谢北京林业大学山西吉县生态站、北京林业大学水土保持学院重点实验室及平台在野外调查和样品分析中给予的支持和帮助,感谢参加本研究外业调查的赵兴凯、刘海燕、许发强、王仙等同学。

#### 参考文献:

[1] 苏日娜. 内蒙古大兴安岭安落叶松林降水化学特征研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2009.

[2] 王醇儒, 罗仲全, 赵仕远. 西双版纳地区降雨和橡胶林内雨养分含量的初步研究[J]. 生态学报, 1984, 4(3): 259-266.

[3] 罗赵慧, 田大伦, 田红灯, 等. 湘潭锰矿废弃地栎树人工林微量元素含量及分布特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(5): 85-90.

[4] 田大伦, 项文化, 康文星. 马尾松人工林微量元素生物循环的研究[J]. 林业科学, 2003, 39(4): 1-8.

[5] 王新凯, 田大伦, 闫文德, 等. 喀斯特城市杨树人工林微量元素的生物循环[J]. 生态学报, 2011, 31(13): 3691-3699.

[6] 夏菁, 魏天兴, 陈佳澜, 等. 黄土丘陵区人工林养分循环特征[J]. 水土保持学报, 2010, 24(3): 89-93.

[7] 张希彪, 上官周平. 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[J]. 生态学报, 2006, 26(2): 373-382.

[8] 魏天兴, 余新晓, 朱金兆, 等. 黄土区防护林主要造林树种水分供需关系研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(2): 185-189.

[9] 毕华兴, 李笑吟, 李俊, 等. 黄土区基于土壤水平衡的林草覆被率研究[J]. 林业科学, 2007, 43(4): 17-23.

[10] 肖洋, 陈丽华, 余新晓, 等. 北京密云麻栎—侧柏林生态系统 N, P, K 的生物循环[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(S2): 67-71.

[11] 张晓娟, 魏天兴, 荆丽波, 等. 晋西黄土区天然次生林营养分元素分配与积累研究[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(3): 57-62.

[12] 韩有志, 李玉娥, 梁胜发, 等. 华北落叶松人工林林木生物量的研究[J]. 山西农业大学学报, 1997, 17(3): 278-283.

[13] 刘世荣. 兴安落叶松人工林生态系统营养元素生物地球化学循环特征[J]. 生态学杂志, 1992, 11(5): 1-6.

[14] 王庆礼, 代力民, 许广山. 简易森林土壤容重测定方法[J]. 生态学杂志, 1996, 15(3): 68-69.

[15] 文仕知, 张希, 杨丽丽. 长沙市郊枫香人工林养分归还研究[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(5): 98-103.

[16] 廖观荣, 李淑仪, 蓝佩玲, 等. 桉树人工林生态系统养分循环与平衡研究 I. 桉树人工林生态系统的养分贮存[J]. 生态环境, 2003, 12(2): 150-154.

[17] 孙祖琰, 周起如, 孙全先, 等. 河北省土壤铁的含量与分布[J]. 华北农学报, 1987, 2(1): 49-54.

[18] 刘洋, 张健, 冯茂松. 巨桉人工林凋落物数量、养分归还量及分解动态[J]. 林业科学, 2006, 7(7): 1-10.

[19] 杨丽丽, 文仕知, 何功秀. 长沙市郊枫香人工林营养元素生物循环特征[J]. 福建林学院学报, 2012, 32(1): 48-53.

[20] 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[J]. 植物生态学报, 1999, 23(4): 64-73.

[21] 张希彪, 上官周平. 黄土丘陵区主要林分生物量及营养元素生物循环特征[J]. 生态学报, 2005, 3(3): 527-537.

[22] 肖洋, 陈丽华, 余新晓, 等. 北京密云油松人工林生态系统 N, P, K 养分循环[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(S2): 72-75.

[23] 罗辑, 程根伟, 李伟, 等. 贡嘎山天然林营养元素生物循环特征[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(2): 13-17.