

文章编号: 100F 1498(2003) 06 0668 09

西藏色季拉山冷杉林生态系统的养分循环

辛学兵^{1,2}, 翟明普¹

(1. 北京林业大学资源与环境学院, 北京 100083; 2. 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091)

摘要: 对西藏色季拉山急尖长苞冷杉林生态系统的养分循环进行了研究, 结果表明: 养分的总存留量为 $35.41 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 总归还量为 $54.89 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 年吸收总量为 $90.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。冷杉林分具有养分低循环利用特征。大气降水主要补充 N、Ca、Fe 等元素, 而凋落物主要补充 P、K、Fe 等元素, 其中 Fe 元素是净增加的。冷杉林生态系统养分年输入量均大于年输出量, 说明该森林生态系统处于良好的养分积累阶段。林地土壤(不包括凋落物层)的养分年输出量(除 N、Fe、Mg 元素外)稍大于年获得量, 土壤年净亏损不大, 但 K 的亏损较严重。冷杉林分的养分利用效率以及土壤养分利用指数均表明, 林分对 N 的需求最大, 对 Fe 的需求最少。

关键词: 西藏; 急尖长苞冷杉; 生态系统; 养分循环

中图分类号: S791.14 文献标识码: A

生态系统养分元素的循环利用是生态系统的主要功能过程之一。养分元素循环与平衡直接影响生态系统生产力的高低, 并关系到生态系统的稳定和持续。养分元素循环的研究不仅能阐明生态系统物质循环机制, 而且对指导生产实践、调节和改善各种限制因素、提高养分元素的循环利用速率和最大限度地提高生态系统的生产力都具有重要的意义^[1-8]。

西藏东南部(林芝地区)是西藏森林的主要分布区, 现有森林面积 240 万 km^2 , 森林覆盖率达 26.5%, 是我国西南国有林区的主体。由于其特殊的地形、地貌、气候等因素的影响和制约, 使得藏东南森林生态系统具有复杂多变的水热条件、独特的树种组成、丰富的森林植被类型和特殊的分布规律。虽然森林与环境之间的相互作用关系早已引起重视, 但由于森林结构的复杂性和研究技术手段落后, 特别是西藏高原研究地域的艰难, 限制了森林生态系统功能的定量研究。在西藏高原东南部森林资源丰富的生态区域内, 开展森林生态系统养分循环的研究, 进一步完善我国生态系统定位研究大陆网络体系, 同时也填补了在高海拔地区(3 900 m 左右)进行养分循环研究、积累基础数据的国内空白, 为进一步研究西藏高原森林生态系统的物质循环和能量流动提供必要的基础数据。

1 试验地概况

试验观测地设于西藏高山森林生态系统定位站, 位于色季拉山东南坡, 地理位置 $94^{\circ}25' \sim$

收稿日期: 2003 03 11

基金项目: 中国林科院院基金项目“西藏冷杉林生态系统养分循环研究”资助

作者简介: 辛学兵(1967-), 男, 山西临汾人, 副研究员。

94°45' E, 29°35' ~ 29°57' N, 海拔 3 850 m, 属较典型的亚高山温带半湿润气候区, 年平均气温-0.73 °C, 年均日照时数 1 150.6 h, 日照百分率 26.1%, 年均相对湿度 78.83%, 年均降水量 1 134.1 mm, 年均蒸发量 544.0 mm, 6—9 月为雨季, 占全年降水的 75%~82%。土壤以酸性棕壤为主, 土层较厚, 腐殖质化过程明显, 在海拔较高的冷杉林下常有明显的灰化层。试验林面积 1 hm², 海拔 3 850~3 950 m, 坡度 25°, 坡位中, 林分组成为急尖长苞冷杉(*Abies georgei* Orr var. *smithii* (Viguie et Gaussen) Cheng et L. K. Fu) 原始纯林, 平均胸径 76 cm, 平均树高 38 m, 郁闭度 0.7, 平均年龄 200 a, 为成过熟原始林。林下植被主要有西南花楸(*Sorbus rehderiana* Koehe)、柳叶忍冬(*Lonicera leuceolata* Wall.)、冷蕨(*Cystopteris* sp.)、草莓(*Fragaria* sp.) 等。

2 材料与方 法

2.1 野外观测项目

林外雨: 在对照径流场(设置于林外采伐迹地)设置直径为 20 cm 的雨量筒, 分自记和人工两种, 每日晚 8:00 观测, 作为当天的林外降雨量, 且自记装置能记录下降雨的详细过程。

林内雨: 在径流场(设置于急尖长苞冷杉林内)随机设 4 个 400 cm × 20 cm × 15 cm 的集水槽, 槽口出水处连接虹吸式自记雨量计, 可连续记录林内降雨的详细过程, 最后以四个集水槽的雨量平均数作为林内降雨量。

树干径流: 在林内径流场样地内选 5 株不同径级、不同冠幅的冷杉, 将半剖面的圆形塑料胶管粘贴在处理平滑的树干 0.5~1.0 m 高处, 呈“S”型绕树体 3 周后, 将胶管引流至一个体积为 1.0 m³ 的塑料桶内。将 5 株树的平均树干径流量作为单株树干径流量, 以下列公式求出: 总树干径流量=单株茎流量×N(样地内总株数)。

地表径流及壤中流观测: 分别在林内径流场和林外径流场分 5 层(含地表层)进行观测, 每层相距 30 cm。

土壤渗透能力的测定: 用双环测渗仪测定, 双环测渗仪内径为 18 cm, 外径 36 cm, 环高 5 cm。实验时打入地下 5 cm, 同时往内、外筒加水, 水位一直保持 5 cm(注意保持内外水位相同和记录水温)。记录每下降 1 cm 水位所用时间, 再加水至 5 cm, 反复多次, 直至每下降 1 cm 水位所需时间相同为止。分 A、B、C 三层测定, 每月测定 1 次。

枯枝落叶层贮量的测定: 在试验林下选定具有代表性的地点, 在生长季节开始、中期、末期测定枯落物层的总贮量及分层(L、F、H)贮量, 样方面积为 31.623 cm × 31.623 cm(约等于 0.1 m²), 沿一直线重复进行 5~10 次测定, 并称其湿质量(g)。同时, 按不同层次采取铝盒样品, 测定其含水量。

年凋落量的测定: 于林内径流场固定样地内随机布 6 个 1 m × 1 m 纱网, 按季度收集凋落物并称质量(分枯枝、落叶), 烘干得其绝干质量, 可根据样方比例算出每公顷的年凋落量。

凋落物分解速率: 分解过程用一定时间内的失重率表示。将凋落物每份约 200 g 装入 2 mm 孔径的尼龙纱网袋(18 cm × 18 cm)中并编号, 40 °C 烘至恒质量后称干质量。每种样本重复 3 个, 取样时间为秋季。模拟自然状态平放在样地凋落物层中, 底部应接触土壤 A 层。每个月取回样袋, 清除样袋附着杂物, 同原法称干质量, 计算损失质量并将样袋放回原处。即可得到逐月的分解过程。连续数年, 直至样本完全失去原形, 与土壤 A₀ 层一样, 即可得凋落物完整的逐年分解过程。

乔木层生物量及测试样品取样: 将林木分为叶、枝、干、皮、果(含花)、根等组分。为取得准确的样品分布参数, 进一步将枝分为1年生枝和多年生枝; 将叶分为1年生叶和多年生叶; 将根系按细根(根径 < 0.2 cm)、中根($0.2\sim 0.5$ cm)、粗根(> 0.5 cm)和根头区分。按径级选取标准木, 分别于树冠层上、中、下部位的不同方位(东、南、西、北)采集各龄级的枝、叶及果的分析样品。在整株树的2 m区分段分别采集干材、干皮样品。在根系范围内, 分土壤层次(A、B、C三层)采集不同粗度级根系样品。

灌木层生物量及测试样品取样: 随机抽取面积不等的标准地11块, 在每块样地内机械设置1~3个($5\text{ m}\times 5\text{ m}$)灌木调查样方, 记录种类、数量、盖度等指标。将灌木分为干、枝、根、果(含花)、叶等不同组分, 不分龄级。在已设立的林分固定样地内, 选取标准木分别采集干、枝、叶、根、果的分析样品。

草本层生物量及测试样品取样: 将主要种类分出。在已设立的固定样地内, 按梅花形机械布置5块 1 m^2 的小样方, 收集各样方内的全部草本植物, 分类混合后, 采集地上部分(茎、叶)、地下部分(根系)的分析样品。

附生物生物量及测试样品取样: 选取整个林分的标准木, 将标准木上的附生物(松萝)全部采摘取样。

采样时间及数量: 有关养分贮量空间分布的森林植物样品的采集时间为2001年10月15日至25日, 有关养分贮量时间分布的植物样品在2002年整个生长季节内进行, 每月定期采集林木不同组分的分析样品, 采集木质组分、叶和细根的样品数不少于0.5 kg。

植物样品的处理: 新鲜样品采集后, 刷去灰尘, 然后把样品放入 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 的鼓风烘箱中烘 $10\sim 30$ min, 将样品取出摊开风干或将装样品的布袋置于 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 的鼓风烘箱中, 烘 $12\sim 24$ h, 使其快速干燥后, 再将烘干的植物样品在植物粉碎机中进行磨碎处理, 全部样品必须一起粉碎, 然后通过2 mm孔径筛子, 用分样器或四分法取得适量的分析样品。一些需要进行微量元素的分析样品, 采用玛瑙研钵进行研磨, 用尼龙网筛过筛。经过磨碎的样品, 均分别装入磨口广口瓶或塑料瓶中备用(在瓶内外贴上标签)。

土壤及根区土壤的取样: 在冷杉标准木四周不同方向、不同层次分别选取土样, 按根系在林木周围的分布情况, 分别四个方向选取平均根系附近的根区土壤, 取土范围为根系附近10 cm以内。

2.2 水的养分含量测定

分别采用下列方法: Cl^- ——硝酸银滴定法; SO_4^{2-} ——硫酸钡比浊法; PO_4^{3-} ——钼蓝比色法; CO_3^{2-} 、 HCO_3^- ——双指示剂滴定法; N ——碱解蒸馏法; Na、K ——火焰光度法; Ca、Mg、Zn、Fe ——原子吸收光谱法。

2.3 植物和土壤样品的养分含量测定

植物和土壤样品的养分含量均采用下列方法: 有机质 ——重铬酸钾法; 全N ——凯氏半微量法; 全P、速效P ——钼锑抗分光光度法; 全K、全Na、速效K ——火焰分光光度法; 全Ca、全Mg、全Fe、全Cu、全Mn、全Zn、速效Ca、速效Mg、速效Fe、速效Cu、速效Mn、速效Zn ——原子吸收分光光度法; 速效N ——直接蒸馏法。

3 结果与分析

3.1 冷杉林生态系统养分元素的生物循环

林分养分的积累速率主要通过林分的存留量来反映。林分的存留量主要由乔木、灌木等植物的年净生长量组成, 是 1 a 内植物为建造自身而存留于主干、枝、叶片及根系中的养分总量(表 1)。研究表明系统中的养分年净增长量为 $37.17 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 其中乔木、灌木分别占 56.42% 和 43.58%; 地上部分和地下部分分别占 93.38% 和 6.62%。各元素的年净增长量从大到小的顺序为 $\text{N} > \text{Mg} > \text{K} > \text{Ca} > \text{Mn} > \text{P} > \text{Cu} > \text{Na} > \text{Fe} > \text{Zn}$ 。

表 1 冷杉林分的养分年净增长量

 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$

项目	有机质	养 分										总计
		N	P	K	Na	Mg	Zn	Fe	Mn	Ca	Cu	
乔木	1 485.62	8.87	1.19	2.48	0.46	2.56	0.09	0.21	2.35	1.91	0.84	20.97
灌木	1 118.22	5.55	0.56	2.24	0.69	2.68	0.05	0.17	0.88	2.62	0.78	16.20
地上	2 406.04	13.52	1.64	4.33	1.02	4.97	0.13	0.36	2.96	4.28	1.50	34.71
地下	197.80	0.90	0.11	0.38	0.13	0.27	0.01	0.02	0.27	0.25	0.12	2.46
总计	2 603.84	14.42	1.75	4.72	1.15	5.24	0.14	0.38	3.22	4.53	1.62	37.17

林分的归还量即冷杉林流向土壤的养分, 主要包括冷杉林地上部分凋落物和地下部分凋落物的年归还量、倒木及枯立木的年归还量以及降水从林冠和树干上淋溶下来的养分等部分。表 2 表明, 冷杉林生态系统的总归还量 $54.89 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 中, 地上部分凋落物、地下部分凋落物、倒木及枯立木、降水的淋溶量所占的比例分别为 23.3%、52.2%、4.1%、20.4%。各元素的归还量从大到小的顺序为 $\text{Mg} > \text{N} > \text{K} > \text{Ca} > \text{Mn} > \text{Na} > \text{P} > \text{Fe}$ 。

表 2 冷杉林分流向土壤库的养分量

 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$

项目	N	P	K	Na	Mg	Fe	Mn	Ca	总计
地上凋落物	4.189	0.208	2.852	0.708	1.628	1.827	0.109	1.250	12.772
地下凋落物	15.159	0.794	3.226	0.748	3.638	0.204	2.138	2.750	28.657
倒木枯立木	0.640	0.120	0.180	0.290	0.210	0.040	0.220	0.550	2.250
淋溶量	-11.080	0.660	0.680	0.100	9.150	-0.430	-	0.620	11.210
归还量	8.91	1.78	6.94	1.85	14.63	1.64	2.47	5.17	54.89

树冠郁闭后, 树木对养分的吸收量迅速下降, 特别是在达到成熟龄的顶级群落中, 如果没有人为干扰, 整个生态系统对环境的养分需求不是很大, 这也是稳定性的一种表现。冷杉林生态系统中的养分元素生物循环情况见表 3。各元素年吸收量大小顺序为 $\text{N} > \text{Mg} > \text{K} > \text{Ca} > \text{Mn} > \text{P} > \text{Na} > \text{Fe}$ 。年吸收总量为 $90.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 存留量和归还量分别占 39.2%、60.8%。

表 3 冷杉林生态系统养分元素生物循环

 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$

项目	N	P	K	Na	Mg	Fe	Mn	Ca	总计
存留量	14.42	1.75	4.72	1.15	5.24	0.38	3.22	4.53	35.41
归还量	8.91	1.78	6.94	1.85	14.63	1.64	2.47	5.17	54.89
吸收量	23.33	3.53	11.66	3.00	19.87	2.02	5.69	9.70	90.30

从表 4 中可以看出, 各元素的吸收系数大小顺序为 $\text{N} > \text{Mg} > \text{Mn} > \text{P} > \text{Ca} > \text{Na} > \text{K} > \text{Fe}$, 说

明冷杉对土壤中 N 元素的利用率最高,其次是 Mg、Mn 等元素,而对 P、Ca、Na、K 等元素的利用率较低,对 Fe 元素的利用率最低。各元素的存留系数大小依次为 $N > Mn > P > Ca > K > Na > Mg > Fe$,说明冷杉对所吸收养分的 N、Mn 元素的利用率最高,对 P、Ca、K、Na 等元素的利用率居中,对 Mg、Fe 等元素的利用率较低。N、Mn、Ca 元素的存留系数大于归还系数,说明植物吸收的这些养分大部分用于构建植物体本身,归还土壤仅为小部分,而其它元素均是存留系数小于归还系数,说明这些元素在林分中发生流失,进一步证明了冷杉林分的老龄化特征。

表 4 冷杉林生态系统养分元素生物循环特征参数

项目	N	P	K	Na	Mg	Fe	Mn	Ca
吸收系数	0.006 30	0.000 26	0.000 07	0.000 21	0.001 06	0.000 01	0.000 88	0.000 21
存留系数	0.618 09	0.495 51	0.404 86	0.383 81	0.263 77	0.188 07	0.566 20	0.467 00
归还系数	0.381 91	0.504 49	0.595 14	0.616 19	0.736 23	0.811 93	0.433 80	0.381 91

注:吸收系数=年吸收量/土壤养分贮量;存留系数=年存留量/年吸收量;归还系数=年归还量/年吸收量。

3.2 冷杉林生态系统养分元素的平衡分析

从表 5 可以看出:在该森林生态系统中, HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、N、C、P、K、Na、Ca、Mg、Zn、Fe 等离子和元素随降水输入的量分别为 74.30、51.57、742.82、23.28、302.07、0.38、0.01、0.03、1.89、8.09、25.13、4.06 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,通过冠层和树干的淋溶量分别为 -19.85、-17.19、-558.72、-11.08、-156.96、0.66、0.68、0.10、0.62、9.15、-6.92、-0.43 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,这些离子和元素以地表径流和土壤渗漏水形式流出该系统的量(地质输出)各为 0.480 00、0.106 00、1.140 00、0.052 00、0.430 00、0.000 50、0.000 03、0.000 79、0.022 00、0.055 00、0.000 70、0.003 90 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。扣除淋溶的净输入量中各元素及离子的大小依次为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{C} > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{Zn} > \text{Mg} > \text{N} > \text{Fe} > \text{Ca} > \text{P} > \text{K} > \text{Na}$;未扣除淋溶的净输入量中各元素及离子的大小依次为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{C} > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{Zn} > \text{N} > \text{Mg} > \text{Fe} > \text{Ca} > \text{P} > \text{Na} > \text{K}$ 。不论是否考虑林冠和树干的淋溶量、降水输入和土壤水分输出的净变化,所有元素及离子的输入都明显大于输出,说明该森林生态系统处于良好的养分积累阶段。

表 5 冷杉森林生态系统的养分平衡分析

项目	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	N	C	P	K	Na	Ca	Mg	Zn	Fe
林外降水	74.30	51.570	742.82	23.280	302.07	0.380 0	0.010 00	0.030 00	1.890	8.090	25.130 0	4.060 0
穿透水	51.99	33.450	179.47	12.030	141.24	0.900 0	0.640 00	0.130 00	2.480	16.840	17.570 0	3.550 0
树干茎流	2.46	0.930	4.63	0.170	3.87	0.140 0	0.050 00	0.002 00	0.030	0.400	0.640 0	0.080 0
淋溶量	-19.85	-17.190	-558.72	-11.080	-156.96	0.660 0	0.680 00	0.100 00	0.620	9.150	-6.920 0	-0.430 0
净输入	54.45	34.380	184.10	12.200	145.11	1.040 0	0.690 00	0.130 00	2.510	17.240	18.210 0	3.630 0
地表径流	0.15	0.043	0.65	0.030	0.26	0.000 2	0.000 02	0.000 07	0.004	0.026	0.000 0	0.000 9
土壤渗漏	0.33	0.063	0.49	0.022	0.17	0.000 3	0.000 01	0.000 72	0.018	0.029	0.000 7	0.003 0
总输出	0.48	0.106	1.14	0.052	0.43	0.000 5	0.000 03	0.000 79	0.022	0.055	0.000 7	0.003 9
净变化①	53.97	34.27	182.96	12.15	144.68	1.040 0	0.690 00	0.129 00	2.488	17.190	18.210 0	3.630 0
净变化②	73.82	51.46	741.68	23.23	301.64	0.380 0	0.010 00	0.029 00	1.868	8.040	25.130 0	4.060 0

注:①考虑淋溶的净变化;②未计淋溶的净变化。

3.3 冷杉林生态系统养分元素的生物地球化学循环

在森林生态系统养分的生物地球化学循环过程中(不包括生物小循环),养分的输入主要是养分的大气输入(干、湿沉降),而养分的地质输入在短期内可视为零;养分的输出是以径流和土壤渗漏水的形式来实现的。

由表6可以看出,大气降水输入的养分提供了植物吸收N、P、K、Na、Ca、Mg、Fe养分的99.79%、10.76%、0.09%、1.00%、19.48%、40.72%、200.89%,凋落物的归还提供了植物吸收量的85.68%、31.77%、53.68%、58.28%、46.91%、27.56%、102.47%。相比之下,大气降水主要补充了N、Fe、Mg、Ca等元素,而凋落物补充了所有元素,其中N、Fe、Mg元素的补充量大于植物的吸收量和土壤流失量之和,因此N、Fe、Mg元素是净增加的。冷杉林生态系统养分年输入量均大于年输出量,林地土壤(不包括凋落物层)的养分年输出量(除N、Fe、Mg元素外)也大于年获得量,土壤年净亏损不大,其中K的亏损稍为严重。可见要维持冷杉林分的稳定持续发展,林地养分状况有赖外源补给。从现在的实际情况分析,冷杉林分中土壤的亏损主要是通过降水和土壤母质的进一步矿化分解来解决的。

表6 冷杉林生态系统养分元素的生物地球化学循环

$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$

序号	项目	N	P	K	Na	Ca	Mg	Fe
1	大气降水输入	23.280	0.380 0	0.010 00	0.030 00	1.890	8.090	4.060 0
2	穿透水	12.030	0.900	0.640 00	0.130 00	2.480	16.840	3.550 0
3	树干茎流	0.170	0.140 0	0.050 00	0.002 00	0.030	0.400	0.080 0
4	地表径流输出	0.030	0.000 2	0.000 02	0.000 07	0.004	0.026	0.000 9
5	土壤渗漏水输出	0.022	0.000 3	0.000 01	0.000 72	0.018	0.029	0.003 0
6	地上枯落物归还	4.829	0.328 0	3.032 00	0.998 00	1.800	1.838	1.867 0
7	地下凋落物归还	15.159	0.794 0	3.226 00	0.748 00	2.750	3.638	0.204 0
8	地上枯落物分解	4.717	0.323 0	2.956 00	0.979 00	1.766	1.795	1.818 0
9	地下凋落物分解	14.553	0.762 0	3.097 00	0.718 00	2.640	3.492	0.196 0
10	植物地上存留	13.520	1.640 0	4.330 00	1.020 00	4.280	4.970	0.360 0
11	植物地下存留	0.900	0.110 0	0.380 00	0.130 00	0.250	0.270	0.020 0
12	系统净积累(1-4-5)	23.228	0.380 0	0.010 00	0.029 00	1.868	8.035	4.056 0
13	淋溶归还(2+3-1)	-11.080	0.660 0	0.680 00	0.100 00	0.620	9.150	-0.430 0
14	植物归还(6+7+13)	8.908	1.782 0	6.938 00	1.846 00	5.170	14.626	1.641 0
15	植物吸收(10+11+14)	23.328	3.532 0	11.658 00	2.996 00	9.700	19.866	2.021 0
16	土壤获得(计凋落物,2+3+6+7)	32.188	2.162 0	6.948 00	1.878 00	7.06 00	22.716	5.701 0
17	土壤获得(不计凋落物,2+3+8+9)	31.470	2.125 0	6.743 00	1.829 00	6.916	22.527	5.644 0
18	土壤输出(4+5+15)	23.380	3.533 0	11.658 00	2.997 00	9.722	19.921	2.025 0
19	土壤净增长(17-18)	8.090	-1.408 0-	4.915 00-	1.168 00	-2.806	2.606	3.619 0

3.4 冷杉林生态系统养分元素利用效率

植物对土壤养分资源的利用效率,应是消耗单位土壤速效养分量所获得的生物产量,可用NUE表示:

$$NUE = Y/N_{con} \quad (1)$$

式中 N_{con} 为土壤养分消耗量,它包括养分吸收(N_p)和损失(N_b)两个部分,即:

$$N_{con} = N_p + N_b \quad (2)$$

则(1)式可分解为:

$$NUE = Y/N_{up} \times N_{up}/N_{con} \quad (3)$$

式中 Y/N_{up} 是植物养分利用效率(NUE_p), 说明植物所吸收的养分形成产量的程度, 文献中有称之为生理效率。 N_{up}/N_{con} 为土壤养分利用指数(NUI_s), 说明养分吸收占土壤养分总消耗的比例, 其值小于或等于 1。

对(3)式进一步分解, 得:

$$NUE = Y/N_g \times N_g/N_{up} \times N_{up}/N_{con} \quad (4)$$

式中 N_g 为木材中的养分量, Y/N_g 表示产量与木材中养分量的比值, 可以用 NUE_g 表示。 N_g/N_{up} 是木材中的养分量与养分吸收总量的比值, 可以称之为养分的收获系数, 以 NHI 表示, 其值小于 1, 它说明了所吸收的养分向木材的转移状况, 也称为转移率。

从表 7 中可以看出, 单位土壤养分所获得的植物生物量(NUE)和植物养分利用效率(NUE_p)的大小均为 $Fe > Na > P > Ca > K > Mg > N$, 说明植物生长中需要 Fe 的数量最少, 从土壤中吸收的也最少, 需要 N 的数量最多; 土壤养分利用指数(NUI_s)的大小为 $K > P > Na > Fe > N > Ca > Mg$, 说明植物吸收养分占土壤养分的比例以 K 元素为最高, Mg 元素为最低; 产量与木材中养分量的比值(NUE_g)的大小为 $Fe > Na > Ca > P > K > Mg > N$, 说明木材中 Fe 元素的含量最低, N 元素的含量最高; 养分收获系数(NHI)的大小为 $P > N > K > Ca > Mg > Fe > Na$, 说明了植物所吸收的养分中 P 元素向木材转移的最多, Na 元素转移的最少。

表 7 植物对土壤养分资源的利用效率

项目	N	P	K	Na	Ca	Mg	Fe
NUE	51.04	337.79	102.35	398.17	122.74	59.90	589.28
NUE_p	51.15	337.84	102.35	398.28	123.01	60.06	590.42
NUI_s	0.9978	0.9999	1.0000	0.9997	0.9977	0.9972	0.9981
NUE_g	394.62	1346.45	985.07	5708.82	1510.98	780.82	8242.12
NHI	0.1296	0.2509	0.1039	0.0698	0.0814	0.0769	0.0716

综合上述养分资源利用效率的定义与内涵的阐述和分析可知, 要提高养分资源利用效率应从如下两方面入手。一是提高 NUI_s , 即减少养分的损失和增加植物对养分的吸收; 二是提高植物将所吸收的养分形成木材产量的能力, 也就是提高 NUE_p 。 NUI_s 主要与土壤有关, 即土壤养分对植物的供应能力、有效性和损失状况, 但也与植物的吸收能力等有关; 而 NUE_p 主要与植物本身有关。

3.5 冷杉林生态系统养分元素的生物地球化学循环模型

冷杉林生态系统可划分为五个分室, 分别为植物地上部分(x_1)、植物地下部分(x_2)、植物地上部分凋落物(x_3)、植物地下部分凋落物(x_4)、土壤(x_5)。各分室的营养元素动态模型可表示为:

$$\frac{dx_1}{dt} = f_{21} - f_{13} - f_{15} = a_{21}x_2 - a_{13}x_1 - a_{15}x_1 \quad (5)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = f_{52} - f_{21} - f_{24} = a_{52}x_5 - a_{21}x_2 - a_{24}x_2 \quad (6)$$

$$\frac{dx_3}{dt} = f_{13} - f_{35} = a_{13}x_1 - a_{35}x_3 \quad (7)$$

$$\frac{dx_4}{dt} = f_{24} - f_{45} = a_{24}x_2 - a_{45}x_4 \quad (8)$$

$$\frac{dx_5}{dt} = U_{05} + f_{15} + f_{35} + f_{45} - f_{50} - f_{52} = U_{05} + a_{15}x_1 + a_{35}x_3 + a_{45}x_4 - a_{50}x_5 - a_{52}x_5 \quad (9)$$

式中 a_{ij} 为周转率, 它表示营养元素从 i 分室到 j 分室的流通速率。

根据系统各分室的状态参数, 可求出各分室不同元素的周转率(表 8), 建立冷杉林生态系统不同元素的分室模型。

表 8 不同元素在各分室的周转率

参数	N	P	K	Na	Ca	Mg	Fe
a_{13}	0.002 70	0.001 32	0.005 61	0.008 84	0.003 83	0.003 08	0.039 81
a_{15}	-0.006 18	0.002 65	0.001 26	0.000 89	0.001 32	0.015 32	-0.009 17
a_{21}	0.100 26	0.345 79	0.306 16	0.271 54	0.356 38	0.797 90	1.057 06
a_{24}	0.209 09	0.104 47	0.122 66	0.095 90	0.146 28	0.181 90	0.120 00
a_{35}	0.032 09	0.019 42	0.043 43	0.022 09	0.021 55	0.035 69	0.052 15
a_{45}	0.921 66	0.918 36	0.921 71	0.920 62	0.923 08	0.921 50	0.932 57
a_{50}	1.404 65E-05	3.635 57E-08	1.790 46E-10	5.419 05E-08	4.786 29E-07	2.930 38E-06	2.451 54E-08
a_{52}	0.006 30	0.000 26	0.000 07	0.000 21	0.000 21	0.001 06	0.000 01

4 结论

系统中的养分总存留量为 $35.41 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 各元素的存留量从大到小的顺序为 $\text{N} > \text{Mg} > \text{K} > \text{Ca} > \text{Mn} > \text{P} > \text{Na} > \text{Fe}$; 养分的总归还量为 $54.89 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 各元素的归还量从大到小的顺序为 $\text{Mg} > \text{N} > \text{K} > \text{Ca} > \text{Mn} > \text{Na} > \text{P} > \text{Fe}$; 年吸收总量为 $90.30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 各元素的年吸收量大小顺序为 $\text{N} > \text{Mg} > \text{K} > \text{Ca} > \text{Mn} > \text{P} > \text{Na} > \text{Fe}$ 。存留量和归还量分别占年吸收量的 39.2%、60.8%。

各元素的吸收系数大小顺序为 $\text{N} > \text{Mg} > \text{Mn} > \text{P} > \text{Ca} > \text{Na} > \text{K} > \text{Fe}$, 说明冷杉对土壤中 N 元素的利用率最高, 对 Fe 元素的利用率最低。各元素的存留系数大小依次为 $\text{N} > \text{Mn} > \text{P} > \text{Ca} > \text{K} > \text{Na} > \text{Mg} > \text{Fe}$, 说明冷杉对所吸收养分的 N、Mn 元素的利用率最高, 对 Mg、Fe 等元素的利用率较低。存留系数与归还系数相比, N、Mn、Ca 元素的存留系数大于归还系数, 说明植物吸收的这些养分大部分用于构建植物体本身, 归还土壤仅为小部分, 而其它元素均是存留系数小于归还系数, 说明这些元素在林分中发生流失。

不论是否考虑林冠和树干的淋溶量、降水输入和土壤水分输出的净变化, 所有元素及离子的输入都明显大于输出, 说明该森林生态系统处于良好的养分积累阶段。

冷杉林生态系统养分元素的生物地球化学循环的结果显示: 大气降水主要补充了 N、Ca、Fe 等元素, 而凋落物主要补充了 P、K、Fe 等元素, 其中 Fe 元素是净增加的。冷杉林生态系统养分年输入量均大于年输出量, 林地土壤(不包括凋落物层)的养分年输出量(除 N、Fe、Mg 元素外)也大于年获得量, 土壤年净亏损不大, 其中 K 的亏损稍为严重。

单位土壤养分所获得的植物生物量(NUE)和植物养分利用效率(NUE_p)的大小均为 $\text{Fe} >$

Na> P> Ca> K> Mg> N, 说明植物生长中需要 Fe 的数量最少, 从土壤中吸收的也最少, 需要 N 的数量最多; 土壤养分利用指数(NUI_s) 的大小为 K> P> Na> Fe> N> Ca> Mg, 说明植物吸收养分占土壤养分的比例以 K 元素为最高, Mg 元素为最低; 产量与木材中养分量的比值(NUE_g) 的大小为 Fe> Na> Ca> P> K> Mg> N, 说明木材中 Fe 元素的含量最低, N 元素的含量最高; 养分的收获系数(NHI) 的大小为 P> N> K> Ca> Mg> Fe> Na, 说明了植物所吸收的养分中 P 元素向木材转移的最多, Na 元素转移的最少。

参考文献:

- [1] 刘文耀. 林冠附生物在森林生态系统养分循环中的作用[J]. 生态学杂志, 2000, 19(2): 30~ 35
- [2] 叶功富, 张水林, 徐俊森, 等. 木麻黄林生态系统营养元素的动态模拟[J]. 浙江林业科技, 1997, 17(3): 9~ 14
- [3] 刘增文, 李玉山, 刘秉正, 等. 黄土残塬沟壑区刺槐人工林生态系统的养分循环与动态模拟[J]. 西北林学院学报, 1998, 13(2): 34~ 40
- [4] 关继义, 陈义亮, 祝宁, 等. 灌木层及主要灌木树种在蒙古栎林养分循环中的地位和作用[J]. 植物研究, 1999, 19(1): 100~ 110
- [5] Frangi J L, Lugu A E. Biomass and nutrient accumulation in ten year old bryophyte communities inside a flood plain in the Luquillo experimental forest[J]. Puerto Rica Biotropica, 1992, 24: 106~ 112
- [6] Nadkarni N M, Matelson T J. Biomass and nutrient dynamics of epiphytic litterfall in a Neotropical montane forest[J]. Costa Rica Biotropica, 1992, 24: 24~ 306
- [7] Veneklaas E. Nutrient fluxes in bulk precipitation and throughflow in two montane tropical rain forests[J]. Colombia J Ecol, 1991, 68: 573~ 588
- [8] Aber J D, Melillo J M, Mcclaugherty C A. Predicting long term patterns of mass loss, nitrogen dynamics and soil organic matter formation from initial fine litter chemistry in temperate forest ecosystems[J]. Canadian journal of Botany, 1990, 68: 2201~ 2208

Studies on Nutrition Cycle of *Abies georgei* Forest Ecosystem of Mountain Segila in Tibet

XIN Xue-bing^{1, 2}, ZHAI Ming-pu¹

(1. College of Resources and Environment, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Research Institute of Forestry, CAF, Beijing 100091, China)

Abstract: The results on nutrition cycle of *Abies georgei* forest ecosystem of Mountain Segila in Tibet ($94^{\circ}25' \sim 94^{\circ}45' E$, $29^{\circ}35' \sim 29^{\circ}57' N$, 3 850 m~ 3 950 m) showed that the total preserving quantity in the ecosystem of the *Abies georgei* forests was $35.41 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, the total quantity of nutrient reversion was $54.89 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, and the total quantity of nutrient absorption was $90.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. Therefore, the total quantity of nutrient inputs per year was larger than that of nutrient outputs per year, and the net deficit per year of the soil (the litter layer is not included) in forest lands was not so significant. Nevertheless, the deficit of the element K was a little bit serious. The nutrient utilization efficiency of the *Abies georgei* forests and nutrient utilization index of the soil showed that the requirement for the element N of the forests was the largest, and that for the element Fe was the least. It was shown from the prediction of the nutrients in the ecosystem that the quantity of the nutrient elements would change very slowly within the next eighty years.

Key words: Tibet, *Abies georgei* var. *smithii*; forest ecosystem; nutrient cycle