

DOI: 10.5846/stxb201308092050

何介南, 康文星, 王东, 姚利辉. 连栽第 1 和第 2 代杉木近熟林水文过程养分动态比较. 生态学报, 2015, 35(8): 2581-2591.

He J N, Kang W X, Wang D, Yao L H. Characteristics of nutrient dynamic in hydrological processes of first and second rotations of prematured Chinese fir plantations. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(8): 2581-2591.

连栽第 1 代和第 2 代杉木近熟林水文过程养分动态比较

何介南¹, 康文星^{1,2,3,*}, 王东¹, 姚利辉¹

1 中南林业科技大学, 长沙 410004

2 南方林业生态应用技术国家工程实验室, 长沙 410004

3 国家野外科学观测研究站, 会同 418307

摘要: 利用小集水区径流场技术和定位研究方法, 在获得连栽两代杉木近熟林的大气降水、穿透林冠水、地表、地下径流量等水文学数据, 并测定其养分含量的基础上, 研究了连栽两代杉木近熟林水文过程的营养动态特征。结果表明: 降水中养分浓度第 2 代林比第 1 代林高 20.30%—39.64%, 养分的输入量比第 1 代多 38.52%; 穿透水中养分浓度, 第 1 代和第 2 代林分别比大气降水中高 4.149—4.895 g/kg 和 4.271—5.605 g/kg, 雨水对冠层营养物质的淋溶, 第 2 代比第 1 代高 2.94%—21.37%; 地表径流中的养分浓度两代林差异不大, 地下径流中的养分浓度第 2 代林比第 1 代高 48.06%—78.87%, 径流输出的养分第 2 代林是第 1 代林的 1.58—2.61 倍; 养分地球化学循环中, 第 1 代林养分地球化学循环速率 26.75%—29.95%, 第 2 代林 37.24%—47.43%, 养分地球化学循环的周期第 1 代林 3.3—3.7a, 第 2 代林 2.1—2.7a, 养分地球化学循环中第 2 代林的养分流失率是第 1 代林的 1.30—1.72 倍, 养分的净积累率只有第 1 代林的 73.57%—87.14%。系统持留与利用由外界输入的养分功能上, 第 2 代林低于第 1 代林。

关键词: 杉木人工林; 连栽; 水文过程; 营养动态; 地球化学循环

Characteristics of nutrient dynamic in hydrological processes of first and second rotations of prematured Chinese fir plantations

HE Jienan¹, KANG Wenxing^{1,2,3,*}, WANG Dong¹, YAO Lihui¹

1 Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

2 National Engineering Laboratory for Applied Technology of Forestry & Ecology in South China, Changsha 410004, China

3 National Field Station for Scientific Observation & Experiment in Huitong Hunan, Huitong 418307, China

Abstract: Based on the small watershed technique and the located observation method, the hydrology data collected of the precipitation, penetrate the canopy water, surface and underground runoff, and determine its nutrient content, which were used for analyzing the nutrient dynamic in hydrologic process on the successive rotations of Chinese fir plantations at near mature forest. The replanting its purpose to reveal functional differences in the two generations of Chinese fir in biogeochemical cycling of nutrients, and study the problem of declining productivity even planted fir plantations provide ideas and evidence. The results showed that the nutrient concentrations in precipitation of the second generation forest was 20.30%—39.64% higher than that in first-generation forest, which accounted in total for 38.52% more input of nutrients in

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项(201104009); 科技部公益性研究项目(2007-4-15); 国家野外科学观测研究站项目(20080615); 湖南省教育厅重点项目(2011A135)

收稿日期: 2013-08-09; **网络出版日期:** 2014-7-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: kwx1218@126.com

second generation than that in the first generation forest. The nutrient concentrations in the through fall in the forest of the first and the second generation was relatively 4.149—4.895 g/kg and 4.271—5.605 g/kg higher than that in the corresponding atmospheric precipitation, respectively. Rain canopy leaching of nutrients, which the nutrient content was 2.94% to 21.37% higher in the second generation forest than that in the first generation forest after leaching through the canopy. There was not significantly different between the nutrient concentrations in surface runoff of the first and that in the second generation forest. The nutrient concentrations subsurface runoff of second generation forest, however, was 48.06% — 78.87% higher than that in the first generation forest, which induced the runoff output in the runoff, the second generation forest was 1.58 to 2.61 times more than that in the first generation forest. The nutrient geochemical rate was 26.75% to 29.95% in the first generation forest, while in the second generation forest the nutrient geochemical cycle was 37.24% to 47.43%, and The nutrient geochemical cycle was 3.3 to 3.7 years in the first generation forest, while was 2.1 to 2.7 years in the second generation forest. The nutrient loss rate of the second generation forest was from 1.30 to 1.72 times higher than that in the first generation forest, and the nutrient accumulation rate in the second generation forest was from 73.57% to 87.14% of that in the first generation forest. As to the retention and utilization in the input of nutrients from the outside, the nutrient retention and utilization efficiency of the second generation forest was lower than that of the first generation forest.

Key Words: chinese fir plantation; successive rotations; hydrological processes; nutrient dynamic; geochemical cycling

早在 1876 年, Ebermayer 分析了森林养分循环中凋落物的重要作用^[1]。但是直到 1930 年, 森林生态系统养分循环的研究才逐渐被人们重视。Bazilevich 和 Bobin 通过枯落物及其养分转化分析建立了植被类型中养分循环的分类理论^[2], 把植物养分学研究扩展到生物地球化学领域。地球化学循环和生物地球化学循环是两个不同的概念, 确定它们之间的定量关系的是 Cole^[3]。从此, 森林生态系统养分循环的研究从生态系统内部的生物循环和生物地球化学循环扩展到不同生态系统之间的地球化学循环^[4-8]。

国内多集中在森林生态系统中养分积累、分配和循环的研究^[9-13], 在养分地球化学循环方面, 大多对降雨过程中森林生态系统的养分输入、降雨对植物的淋溶和淋洗^[14-16], 以及土壤水分渗透、渗漏、水土流失对森林养分输出的影响进行研究^[17-18]。我国最早较为系统地研究森林养分地球化学循环是潘维铸, 他利用小集水区径流场测定技术, 研究了杉木林水文过程养分地球化学循环^[19]。随后, 海南岛热带山地雨林主要养分的地球化学循环^[20], 云南哀牢山大气降雨过程中养分输入及输出变化^[21], 第 2 代杉木林水文过程的养分动态^[22-23], 西藏南伊沟原始林芝云杉林水文过程的水化学特征^[24]等成果先后出现。相对于养分生物地球化学循环而言, 养分的地球化学循环研究成果较少。

本研究以湖南会同“国家野外科学观测研究站”的连栽第 1 和第 2 代杉木林为研究对象, 利用定位连续测定数据, 研究连栽两代杉木林近熟林(17—21 年生)水文过程的养分动态特征。揭示连栽两代杉木林在养分地球化学循环中功能差异, 同时为杉木人工林连栽生产力下降问题的研究提供思路和依据。

1 研究地区概况

本研究在“湖南会同杉木林生态系统国家野外科学观测研究站”第 3 小集水试验区进行。第 3 小集水试验区面积 1.9 483 hm², 主流场 230 m, 平均宽度 25.6 m, 流域形状系数 0.37, 平均坡度 25°, 坡向 N, 海拔高度 280—355 m。研究地区属于中亚热带季风湿润气候区。年均气温 16.8 °C, 年均相对湿度 80% 以上, 年降雨量 1 000—1 500 mm。母岩为震旦纪板溪系变质的板(页)岩, 风化程度甚深。土层厚度 80 cm 以上, 土壤为中有有机质厚层黄壤。

第 3 小集水试验区原为残存的阔叶次生林。1966 年炼山、全垦挖穴营造杉木人工林^[25], 21 年生后(1987 年冬), 杉木全部皆伐(采伐时林分密度 2 286 株/hm², 林分平均高 14.5 m, 平均胸径 14.7 cm, 林冠层厚度 9.5 m, 林分郁闭度 0.90)。1988 年春, 在采伐迹地, 营造第 2 代杉木林(造林密度 2 400 株/hm²)。到 2009 年, 林

龄为 21a, 林分密度 2 310 株/hm², 林分平均高 13.8 m, 平均胸径 14.1 cm, 林冠层厚度 9.0 m, 郁闭度约为 0.88^[26]。两代杉木林栽植后都是前 3 年春秋两季各抚育一次, 以后没有进行追肥、间伐抚育与管理。

离研究林地西北方向不足 500 m(其间是农田), 有一条平行于研究林地由湖南(会同县)进入贵州(天柱县)的公路。1983—1987 年(第 1 代林 17—21 年生), 该公路为泥沙路面, 2005—2009 年(第 2 代林 17—21 年生), 该公路已扩宽成水泥路面, 成为由湖南进入贵州天柱县的主要干道。

2 研究方法

2.1 水文过程测定方法

1982 年(第 1 代林 16 年生)在林场实验林内修建了 8 个杉木林小集水区径流场(小集水区径流场, 即在集水区的天然分水界线上修筑水墙, 准确控制汇水面积, 在集水区口最低处, 从不透水的基岩层上建筑截水墙封闭起来, 分别修建地表、地下水测流堰口)^[27], 连续定位测定杉木林的水文过程。

降雨量: 用安装在两座观测铁塔(高于林冠)上的 SL-1 型遥测雨量计和标准雨量筒测定。

穿透雨量: 在小集水区山坡的上、中、下部各安装 1 个 18—20 m²的穿透雨承接装置, 穿过林冠层落入承接装置内的穿透雨量流入 SW-40 型日记水位计测定(穿透雨量的测流堰箱安装有水流出口为 6°三角形测流堰板, 用 SW-40 型日记水位计测定穿透雨量流出 6°三角形堰板的水位高度。通过实验, 建立 6°三角形测流堰板的水位高度与流量的关系方程, 将方程展开制成数表, 便可根据水位计记录的水位高度, 由表查出流量值^[27])。在树干 1.5 m 高处到基部用聚乙烯塑料管蛇形缠绕把树干流引入一个特制的瓷罐中测定树干流, 另把 10 株杉木树干流导管捆扎在一起插入 SL-1 型遥测雨量计中, 实现树干流量自动记录。

地表、地下径流量: 用分别安装在地表、地下径流测流堰口的 SW-40 型日记水位计测定(地表、地下径流测流堰口分别安装流水出口为 60°和 20°三角形测流堰板, 用 SW-40 型日记水位计分别测定地表径流流出 60°和地下径流流出 20°三角形测流堰板的水位高度, 然后根据记录的水位高度, 分别从已编制好的 20°和 60°角度三角形测流堰板的水位高度与流量关系的数表中, 查出某 1 水位高度的流量值(20°和 60°三角形测流堰板水位高度与流量关系都有编制好的数表, 一般水文站都有这样的数表))^[27]。

2.2 营养元素测定

雨水中的养分不仅与降水性质有关, 而且还受降水时天气状况(久晴或久雨、雷电、风向、风速等)以及大气环境受污染的程度等诸多因素的影响。为了使降水中的各种养分浓度的测定值更加逼近实际, 对其样本的取样, 采取了 3 条措施^[19]: (1) 必须分别采集不同季节、不同天气状况下的样本(包括冠上降雨、穿透雨、树干流、地表径流、地下径流, 下同); (2) 根据一次性降水的雨量和雨强分别采集样本, 尤其注重一次性降水雨量大的雨水样本收集; (3) 采用大样本法, 降水次数多的月份取样次数不少于 5 次(每年取样的降水次数占全年降水次数的比例, 第 1 代林为 31.54%—47.06%, 第 2 代林 35.33%—47.37%(表 1)), 取样样品代表的降雨量, 都应在 70%以上(凡是一次性降雨量大于 10mm 的降雨都一定要取样)。所取水样装入小塑料瓶内, 滴 2—3 甲醛溶液(杀菌)后, 即送入实验室进行分析。

营养元素测定: 蒸馏比色法测定水样中的 NH₄-N、NO₃-N 和有机 N, P 用磷钼兰比色法, K、Ca、Mg 用原子吸收分光光度计测定。计算出样品降雨量、穿透雨量、树干流量、地表径流量、地下径流量的养分浓度, 再根据每年在各次取样的降雨量、穿透雨量、树干流量、地表径流量、地下径流量分别相应占全年的各自的比例, 用加权平均法计算其各自的年平均养分浓度(表 2 和表 3, 表 2 中穿透雨养分浓度是把树干流、穿透雨量养分浓度分别按它们所占权重统计计算成的(由于杉木树皮特性, 沿树干流入林地的雨水量非常少, 为了表格制作方便把它们归纳在一起))。

2.3 养分地球化学循环功能估算

每年从外界输入系统的养分量, 由每年水文过程测定的大气降雨量乘上雨量中的养分浓度求得。每年从系统内输出系统外的养分量, 利用系统每年的径流量(地表和地下)与其中的养分浓度相乘得到。系统每年

净积累养分量,用每年从系统外输入养分量减去每年输出系统外的养分量求算。养分循环速率则是每年输出系统外的养分量与每年从系统外输入养分量的比值。

表 1 杉木人工林生态系统水文过程养分测定次数

Table 1 Nutrients determination number of hydrological processes in Chinese fir plantation ecosystem (N)

代数 Generation	项目 Items	林龄 Stand age/a				
		17 a	18 a	19 a	20 a	21 a
1	降水次数	142	136	153	162	149
	取样次数/与降水次数的比例/%	66/46.47	63/46.32	72/47.06	68/41.97	47/31.54
	测定大气降水次数	66	43	72	68	47
	测定穿透水次数	66	43	72	68	47
	测定地表径流次数	32	25	43	45	38
	测定地下径流次数	66	43	72	68	47
2	降水次数	150	139	133	154	156
	取样次数/与降水次数的比例/%	73/35.33	57/41.01	63/47.37	59/38.31	72/46.15
	测定大气降水次数	73	57	63	59	72
	测定穿透水次数	73	57	63	59	72
	测定地表径流次数	42	33	39	41	55
	测定地下径流次数	73	57	63	59	72

测定地表径流养分次数少于取样次数,是因为有些一次性降水过程没有地表径流产生,但有些一次性降水采取了大气降水、穿透雨等水样,没有地表径流样品,只对大气降水、穿透雨等水样进行养分测定,而没有地表径流养分测定

3 结果与分析

3.1 降水中营养输入

从表 2 中看出,相同林龄时大气降雨中,第 1 代林降雨中 N、K、Mg 元素浓度均低于第 2 代,P 的浓度均高于第 2 代,Ca 的浓度只有 1a 低于第 2 代,其余高于第 2 代。两代林同一林龄的降雨中各养分元素浓度,除个别年份的 P 或 Mg 差异不显著($P \geq 0.05$)外,其余都存在差异显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$)(表 2)。第 2 代林降雨中养分浓度比第 1 代高 20.30%—39.64%。两代林大气降水中的养分浓度差异,可能与两代林大气降水时天气状况有关。此外,离研究林地西北方向平行于研究林地的公路,第 2 代林 17—21 年生的车流量已是第 1 代的几十倍,汽车排放的尾气,以及行驶中扬起的灰尘比第 1 代时多,大气环境受污染的程度严重些。这可能是第 2 代大气降水中的养分浓度高于第 1 代林的主要原因。

每年伴随降雨进入第 1 和第 2 代林的养分,第 2 代比第 1 代多 6.92—18.63 kg hm⁻² a⁻¹。其中,N 和 K 的输入量第 2 代分别比第 1 代多 2.64—5.61 kg hm⁻² a⁻¹,5.58—8.83 kg hm⁻² a⁻¹;P 的输入量两代林相差不大;Ca 的输入量除第 2 代 17 年生多于第 1 代 17 年生,其余年份比第 1 代少;Mg 的输入量仅只有 20 年生第 1 代高于 20 年生第 2 代,其余都比第 2 代低。第 2 代林降水中输入养分量比第 1 代多,不仅与降水量大小有关(第 2 代林年平均降水量比第 1 代多 11.58%),而且也与雨水的养分浓度有关(第 2 代林降水中的平均养分浓度比第 1 代多 0.767 g/kg)。

3.2 雨水对林冠层的淋溶作用

从表 2 中看出,两代林同一林龄穿透雨中各养分元素浓度大小, N、P、Ca 的浓度第 1 代低于第 2 代林;K 的浓度第 1 代林只有 1 年比第 2 代低,其余比第 2 代高, Mg 的浓度与 K 的浓度完全相反。两代林同一林龄穿透雨中 K 元素浓度,大部分差异不显著($P \geq 0.05$),其余 N、P、Ca 和 Mg 都存在差异显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$)(表 2)。透雨中总的养分浓度第 1 代林 6.911—8.025 g/kg,第 2 代林 8.123—9.373 g/kg,分别比大气降水中高 4.149—4.895 g/kg 和 4.271—5.605 g/kg。穿透雨中营养化学发生了富集,养分浓度增加,这是穿透雨对冠层枝叶的淋溶作用引起的。

表 2 杉木人工林生态系统水文过程的养分输入特性

林龄/a Stand age	代数 Generation	项目 Items	养分浓度/Nutrient concentration/(kg/g)											养分量/Amount of nutrients/(kg hm ⁻² a ⁻¹)										
			N	P	K	Ca	Mg	合计Sum	N	P	K	Ca	Mg	合计Sum										
17	1	降雨中养分 (1174.5mm)	0.426**	0.023a	0.856**	1.145*	0.312**	2.762	5.00**	0.27a	10.05**	13.45**	3.66**	32.43										
		穿透雨中养分 (838.1mm)	0.857**	0.053a	2.985a	1.951**	1.052*	6.901	7.18**	0.47**	25.02**	16.35**	8.82**	57.84										
		淋溶养分	0.431**	0.033a	2.129**	0.806**	0.740**	4.139	2.18*	0.20**	14.97**	2.90**	5.16**	25.41										
2	2	降雨中养分 (1325.3mm)	0.759**	0.021a	1.294**	1.367*	0.411**	3.852	10.16**	0.28a	17.15**	18.12**	5.45**	51.06										
		穿透雨中养分 (1085.4mm)	1.167**	0.055a	2.928a	2.659**	1.316*	8.123	12.67**	0.58**	31.78**	28.86**	14.28**	88.17										
		淋溶养分	0.408**	0.032a	1.634**	1.292**	0.905**	4.271	2.06*	0.30**	14.63**	10.74**	8.83**	37.11										
18	1	降雨中养分 (1101.0mm)	0.414**	0.019*	0.941**	1.432*	0.326*	3.132	4.54**	0.21a	10.36**	15.77**	3.59**	34.48										
		穿透雨中养分 (812.5mm)	0.914**	0.046*	3.006a	2.042**	1.353*	7.361	7.32**	0.37**	24.42**	16.59**	10.99**	59.80										
		淋溶养分	0.500**	0.027**	2.065**	0.610**	1.027**	4.229	2.78**	0.16**	14.06**	0.82**	7.40**	25.32										
2	2	降雨中养分 (1325.2mm)	0.765**	0.016*	1.410**	1.334*	0.376*	3.901	10.15**	0.22a	18.69**	15.04**	4.94**	49.04										
		穿透雨中养分 (1053.5mm)	1.525**	0.056*	2.903a	2.920**	1.138*	8.542	16.07**	0.59**	30.59**	30.71**	13.88**	91.84										
		淋溶养分	0.760**	0.040**	1.493**	1.586**	0.762**	4.641	5.92**	0.37**	11.90**	15.67**	8.94**	42.80										
19	1	降雨中养分 (972.6mm)	0.484**	0.021*	0.921**	1.327*	0.301*	3.054	4.71**	0.20a	8.96**	12.91**	2.93**	29.71										
		穿透雨中养分 (734.0mm)	0.885**	0.043*	3.250a	2.173**	1.172*	7.523	6.46**	0.32**	23.74**	15.87**	8.56**	54.95										
		淋溶养分	0.401**	0.022**	2.329**	0.846**	0.871**	4.469	1.75**	0.12**	14.78**	2.96**	5.63**	25.24										
2	2	降雨中养分 (1079.3mm)	0.708**	0.018*	1.395**	1.159*	0.394*	3.674	7.64**	0.19a	15.06**	12.46**	4.24**	39.59										
		穿透雨中养分 (849.2mm)	1.497**	0.059*	3.227a	2.893**	1.416*	9.092	12.71**	0.50**	27.40**	24.57**	12.02**	77.20										
		淋溶养分	0.789**	0.041**	1.832**	1.734**	1.022**	5.418	5.07**	0.31**	12.34**	12.11**	7.78**	37.61										
20	1	降雨中养分 (1098.5mm)	0.464**	0.020a	0.883**	1.273*	0.324a	2.946	5.10**	0.22*	9.70**	13.98**	3.89**	32.89										
		穿透雨中养分 (798.6mm)	0.945**	0.040**	3.036*	2.542**	1.038*	7.601	7.55**	0.32**	24.25**	20.30**	8.29**	60.71										
		淋溶养分	0.481**	0.020**	2.153**	1.269*	0.714**	4.655	2.45**	0.10**	14.55**	6.32**	4.40**	27.82										
2	2	降雨中养分 (1089.2mm)	0.711**	0.019a	1.403**	1.196*	0.337a	3.666	7.74**	0.20*	15.28**	13.03**	3.56**	39.81										
		穿透雨中养分 (835.8mm)	1.504**	0.062**	3.286**	2.905**	1.469**	9.226	12.57**	0.52**	27.46**	24.28**	12.28**	77.11										
		淋溶养分	0.793**	0.043**	1.883**	1.709**	1.132*	5.560	4.83**	0.30**	12.18**	11.25**	9.28**	37.30										
21	1	降雨中养分 (915.6mm)	0.473**	0.022a	0.914**	1.394*	0.327*	3.130	4.50**	0.21a	8.70**	13.27**	3.11**	29.79										
		穿透雨中养分 (702.3mm)	0.927**	0.046*	3.433a	2.374**	1.245*	8.025	7.07**	0.35**	26.17**	18.10**	9.49**	61.18										
		淋溶养分	0.454**	0.024**	2.519**	0.980**	0.918*	4.895	2.57**	0.14**	14.47**	4.83**	6.38**	31.39										
2	2	降雨中养分 (1092.5mm)	0.796**	0.020a	1.396**	1.207*	0.349*	3.768	8.70**	0.22a	15.25**	13.17**	3.82**	41.16										
		穿透雨中养分 (815.5mm)	1.483**	0.058*	3.315a	3.016**	1.501*	9.373	12.09**	0.47**	27.03**	24.60**	12.24**	76.43										
		淋溶养分	0.687**	0.038**	1.919**	1.809**	1.156*	5.605	3.39**	0.25**	11.78**	11.43**	8.42**	35.27										
Average	1	降雨中养分 (1052.4mm)	0.452**	0.0209a	0.903**	1.313**	0.319*	3.005	4.77**	0.22a	9.55**	13.88**	3.44**	31.86										
		穿透雨中养分 (777.1mm)	0.906**	0.047**	3.142**	2.215**	1.172**	7.482	7.12**	0.37**	24.74**	17.44**	9.23**	58.90										
		淋溶养分	0.454**	0.027**	2.239**	0.902**	0.853*	4.477	2.35**	0.15**	15.19**	3.56**	5.79**	27.04										
2	2	降雨中养分 (1174.3mm)	0.748**	0.019a	1.380**	1.252**	0.373*	3.772	8.87**	0.22a	16.28**	14.36**	4.40**	44.13										
		穿透雨中养分 (972.9mm)	1.435**	0.058**	3.132**	2.879**	1.367**	8.871	13.22**	0.53**	28.85**	26.61**	12.94**	82.15										
		淋溶养分	0.687**	0.039**	1.752**	1.627**	0.994*	5.099	4.35**	0.31**	12.57**	12.25**	8.54**	38.02										

差异显著性检验只对两代林同一林龄时的降雨同一种养分元素浓度、养分量、穿透雨同一种养分元素浓度、养分量之间, (两代林同一林龄时的不同养分元素浓度、养分量之间, 不同林龄; 同一种养分元素浓度、养分量之间没有进行差异显著性检验), 它们之间小写字母相同为差异不显著 ($P \geq 0.05$), * 表示显著 ($P < 0.05$), ** 表示极显著 ($P < 0.01$), 括号内为降雨量或穿透雨量 mm

第 2 代林平均淋溶养分浓度比第 1 代多 $1.389 \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ 。有可能停留在两代林冠层枝叶表面来自聚结在细胞壁和角质层内某些营养物质^[9],或蒸腾作用所带出积累在叶面的元素量^[19]有差异;也有可能是,在无雨天由于离林地不远处公路上车辆行驶中扬起的灰尘沉淀在林冠层中的尘埃物质第 2 代比第 1 代林多。

每年降水过程中穿过林冠层到达林内的雨水携带的养分量,第 1 代林是 $54.95\text{—}61.18 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,其中有 $29.71\text{—}34.48 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 是降雨中含的养分,有 $25.24\text{—}31.19 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 是雨水对冠层的淋溶作用增加的;第 2 代林 $76.43\text{—}91.48 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,其中,含有大气降水携带的养分量 $39.59\text{—}51.06 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,由淋溶作用增加 $35.27\text{—}51.06 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。雨水对冠层淋溶增加的养分,第 2 代比第 1 代林多 $4.08\text{—}25.65 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

3.3 径流中的养分输出

从表 3 看出,第 1 代林地地表径流中的养分浓度 $9.698\text{—}10.870 \text{ g/kg}$,平均 10.255 g/kg ;2 代林 $9.962\text{—}11.779 \text{ g/kg}$,平均 11.708 g/kg ,第 2 代稍高于第 1 代林。就平均值而言,第 1 代地表径流中 N、P、K、Mg 浓度稍高于第 2 代林,由此可见,第 2 代林地表径流中的养分浓度高于第 1 代,主要是第 2 代林地地表径流中 Ca 的浓度高于第 1 代引起的(表 3)。两代林相同林龄的地表径流中同一元素的差异分析见表 3。

无论是第 1 代还是第 2 代林,地表径流中的养分浓度不仅比大气降水中多,而且也比穿透雨中高。因为地表径流是穿透雨水通过林地凋落物层接触土壤表面后,因土壤渗透性能的关系形成的。地表径流中不仅包含了穿透雨中的养分,而且也含有从凋落物层淋溶出的养分。

与两代林穿透雨中养分浓度差异相比,其地表径流中的养分浓度差要少些(表 3)。因为两代林近熟林阶段林地凋落物量不一样,第 1 代林地凋落物量 $4.39\text{—}4.84 \text{ t/hm}^2$ ^[28],第 2 代 $3.71\text{—}4.13 \text{ t/hm}^2$ ^[29]。当穿透水通过林地凋落物层形成地表径流时,凋落物层淋溶出的养分量,第 1 代可能比第 2 代林多,这就缩小了原穿透水的养分浓度第 2 代比第 1 代高的差距。因此,也就缩减了两代林地地表径流中的养分浓度差异。

从表 3 看出,两代林地下径流中的养分浓度相同点是:N 的浓度比大气降水中低,Mg 的浓度比大气降水中高 3—4 倍。不同点是:第 1 代林 P 的浓度比大气降水中高,Ca 的浓度与大气降水中相差不大,K 的浓度比大气降水中低;第 2 代林则是,K、Ca 的浓度高于大气降水,P 的浓度与大气降水中相差不大。

第 2 代林地下径流中的平均养分浓度 6.144 g/kg ,是第 1 代林平均 3.918 g/kg 的 1.57 倍。但是相同林龄的第 1 代地下径流中 N、P、Mg 浓度比第 2 代林高,K、Ca 浓度比第 2 代林低(差异分析见表 3),可见,第 2 代林地下径流中的平均养分浓度比第 1 代高,主要是第 2 代林地下径流中 K、Ca 比第 1 代高许多的缘故。第 1 和第 2 代林地下径流中养分浓度差异产生的原因,可能是第 1 代林采伐时林木的随意倒下,搬运木材的拖拽挤压土壤表层,破坏了表层土壤的物理性能。其 0—20cm 土层土壤非毛管孔隙度、总孔隙度、土壤容重都发生了不同程度的变化^[30]。土壤物理性能的转变是一个较为缓慢的过程^[31-32],第 2 代林 21 年生土壤物理性能有可能还没有完全恢复到造林前的水平,这或多或少地影响养分在其表面的持留和粘附,进而影响地下径流中的养分浓度。此外,连栽第 2 代林进入渐熟期的土壤中转化酶、磷酸酶、过氧化氢酶和脲酶等土壤酶的活性均显著低于第 1 代^[33]。土壤酶的活性与土壤营养物质的转化有重要的作用,两代林土壤酶活性的差异,很有可能是产生地下径流中的养分浓度差异的重要原因。

通过径流输出的养分量,第 1 代林为 $7.95\text{—}9.85 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,其中,地下径流养分输出占 $87.30\%\text{—}88.77\%$,地表径流输出占 $11.23\%\text{—}12.70\%$;第 2 代林是 $15.33\text{—}24.26 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,有 $86.48\%\text{—}93.37\%$ 是地下径流贡献的,地表径流仅占 $6.63\%\text{—}13.52\%$ 。就平均而言,第 2 代径流输出的养分量 $18.92 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,是第 1 代 $8.87 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的 2.23 倍,其中,第 2 代地表径流比第 1 代多输出 $0.82 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,地下径流多输出 $9.23 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

3.4 养分地球化学循环

伴随大气降水进入第 1 代林的养分 $29.71\text{—}34.48 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,通过径流输出系统的养分量为 $7.95\text{—}9.85 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,输入减去输出,每年净积累的养分量 $21.66\text{—}25.23 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。由大气降水进入第 2 代林的养分

表 3 杉木人工林生态系统水文过程的养分输出特性
Table 3 Characteristic of nutrient output in hydrological processes in Chinese fir plantation ecosystem

林龄/a Stand age	代数 Generation	项目 Items	养分浓度/Nutrient concentration/(kg/g)											养分量/Amount of nutrients/(kg hm ⁻² a ⁻¹)										
			N	P	K	Ca	Mg	合计Sum	N	P	K	Ca	Mg	合计Sum										
17	1	地表径流养分 (10.1mm)	1.286**	0.074*	3.651*	2.955**	1.732*	9.698	0.13**	0.07**	0.37**	0.30**	0.17**	1.04										
		地下径流养分 (217.5mm)	0.354a	0.055*	0.694**	1.255**	1.422**	3.780	0.77**	0.12**	1.51**	2.73**	3.09**	8.22										
		总径流养分	0.852**	0.069*	4.031*	4.985**	1.842*	11.779	0.90**	0.19a	1.88**	3.03**	3.26**	9.26										
2	2	地表径流养分 (23.8mm)	0.353a	0.052*	1.621**	2.854**	1.279**	6.159	1.12**	0.17**	5.36**	1.66**	0.44**	3.28										
		地下径流养分 (330.4mm)	0.814**	0.070*	3.071a	4.164**	1.843a	9.962	1.96**	0.19a	6.32**	11.09**	4.66**	20.30										
		总径流养分	1.414**	0.078*	3.125a	3.454**	1.914a	9.985	0.14**	0.08**	0.40**	0.34**	0.19**	1.15										
18	1	地表径流养分 (9.7mm)	0.383a	0.054**	0.713**	1.321**	1.493**	3.964	0.78**	0.11**	1.46**	2.69**	3.05**	8.09										
		地下径流养分 (204.2mm)	0.814**	0.070*	3.071a	4.164**	1.843a	9.962	0.92**	0.19*	1.86**	3.03**	3.24**	9.24										
		总径流养分	0.382a	0.045**	1.605**	2.683**	1.154**	5.869	1.28**	0.16**	5.38**	9.00**	3.88**	19.70										
19	1	地表径流养分 (9.0mm)	0.372*	0.060**	0.708**	1.331**	1.506*	3.977	0.65**	0.10**	1.24**	2.32**	2.63**	6.94										
		地下径流养分 (174.6mm)	0.858**	0.067*	3.576*	4.618**	1.895a	11.014	0.77**	0.17a	1.59**	2.62**	2.80**	7.95										
		总径流养分	0.349*	0.044**	1.595**	2.907**	1.438*	6.333	1.32**	0.17a	4.39**	7.80**	3.82**	17.50										
20	1	地表径流养分 (10.2mm)	0.367*	0.043**	1.513**	2.887**	1.363**	6.173	0.86**	0.09**	3.55**	6.79**	3.20**	14.49										
		地下径流养分 (234.8mm)	1.154**	0.071a	3.934**	3.244**	1.902a	10.305	0.94a	0.10**	3.89**	7.20**	3.39	15.52										
		总径流养分	0.384*	0.058**	0.637**	1.402**	1.573**	4.054	0.83**	0.13**	1.37**	3.02**	3.39**	8.74										
21	1	地表径流养分 (10.2mm)	0.825**	0.068a	3.294**	4.011**	1.908a	10.106	0.95a	0.20**	1.77**	3.35**	3.58**	9.85										
		地下径流养分 (234.8mm)	0.361*	0.065**	0.755**	1.345**	1.558*	4.084	0.08**	0.01**	0.34**	0.41**	0.19a	1.03										
		总径流养分	1.398**	0.081**	4.005*	3.505**	1.881*	10.870	1.32**	0.07**	0.35a	0.31**	0.17a	1.01										
2	2	地表径流养分 (8.8mm)	0.877**	0.070**	3.745*	4.267**	1.723*	10.682	0.62**	0.11**	1.30**	2.21**	2.67**	7.02										
		地下径流养分 (171.6mm)	0.352*	0.041**	1.572**	2.794**	1.429*	6.188	0.74**	0.18**	1.65**	2.62**	2.84**	8.03										
		总径流养分	1.313**	0.076**	3.723**	3.290**	1.853*	10.255	0.81**	0.09**	3.63**	6.45**	3.30**	14.28										
平均 Average	1	地表径流养分 (9.6mm)	0.371**	0.058**	0.701**	1.331**	1.510**	3.918	0.90**	0.10**	3.99**	6.87**	3.47**	15.33										
		地下径流养分 (196.7mm)	0.845**	0.069**	3.543**	4.409**	1.842*	11.708	0.86**	0.18**	1.74**	2.90**	3.19**	8.87										
		总径流养分	0.360**	0.045**	1.581**	2.284**	1.333**	6.144	0.14a	0.02**	0.58**	0.84**	0.31**	1.89										
2	2	地表径流养分 (16.7mm)	0.360**	0.045**	1.581**	2.284**	1.333**	6.144	1.06**	0.13**	4.39**	7.80**	3.65**	17.03										
		地下径流养分 (276.6mm)	0.845**	0.069**	3.543**	4.409**	1.842*	11.708	1.20**	0.15**	4.97**	8.64**	3.96**	18.92										
		总径流养分	0.360**	0.045**	1.581**	2.284**	1.333**	6.144	1.20**	0.15**	4.97**	8.64**	3.96**	18.92										

差异显著性检验只对两代林同一林龄时的地表径流同一养分元素浓度、养分量, 地下径流同一养分元素浓度、养分量之间的分析(地表、地下径流不同养分元素浓度、养分量, 两代林同一林龄时的地表与地下径流同一养分元素浓度、养分量之间, 没有进行差异显著性检验), 它们之间小写字母相同为差异不显著($P \geq 0.05$), * 表示显著($P < 0.05$), ** 表示极显著($P < 0.01$), 括号内为地表或地下径流量 mm, 总径流养分浓度一栏中为空格, 是因为它是地表与地下径流的加权平均值, 而地表与地下径流输出的养分量是分别计算的, 总径流输出的养分量之和, 故总径流养分浓度在此已无意义

是 $39.59\text{--}51.06\text{ kg hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$, 通过径流输出系统的养分为 $15.33\text{--}24.26\text{ kg hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$, 输入与输出相抵, 第 2 代林每年净积累养分量 $22.05\text{--}26.84\text{ kg hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 。两代林相比, 林分净积累养分量第 2 代稍多于第 1 代林。这是第 2 代林降水量及雨水的养分含量比第 1 代林多的缘故。

从另一个角度即从径流中的养分输出及净积累养分量占降水输入的比例, 来分析第 1 和第 2 代林的养分地球化学循环功能。第 1 代林每年输出的养分占输入养分的比例为 $26.75\%\text{--}28.56\%$, 净积累养分量占输入量的 $71.44\%\text{--}73.25\%$, 也就是说, 每年从系统外输入到第 1 代林内的养分中约有 $3/4$ 被系统滞留利用, 只有 $1/4$ 流失到系统外。第 2 代林每年输出到系统外的养分占输入量的 $37.24\%\text{--}47.43\%$, 系统净积累的养分只有输入 $52.57\%\text{--}62.76\%$ 。相互对比可知, 第 2 代林的养分流失率是第 1 代林的 $1.30\text{--}1.72$ 倍, 养分的积累率只有第 1 代林的 $73.57\%\text{--}87.14\%$ 。

第 1 代林地球化学循环中 N、P、K、Ca、Mg 循环速率分别为 $16.35\%\text{--}20.27\%$, $70.37\%\text{--}90.91\%$, $17.75\%\text{--}18.97\%$, $19.21\%\text{--}25.96\%$, $89.02\%\text{--}95.56\%$, 平均 $26.75\%\text{--}29.95\%$; 第 2 代相应为 $10.34\%\text{--}19.48\%$, $45.45\%\text{--}89.47\%$, $26.16\%\text{--}36.85\%$, $52.16\%\text{--}67.95\%$, $85.11\%\text{--}95.23\%$, 平均 $37.24\%\text{--}47.43\%$ 。

第 1 代林 N、P、K、Ca、Mg 地球化学循环周期分别是 $4.9\text{--}6.1\text{a}$, $1.1\text{--}1.4\text{a}$, $5.3\text{--}5.6\text{a}$, $3.9\text{--}5.2\text{a}$, 1.1a , 平均 $3.3\text{--}3.7\text{a}$; 2 代林是 $5.1\text{--}9.7\text{a}$, $1.1\text{--}2.0\text{a}$, $2.7\text{--}3.9\text{a}$, $1.5\text{--}1.9\text{a}$, $2.1\text{--}2.7\text{a}$, 平均 $2.1\text{--}2.7\text{a}$ 。

以上分析看出, 第 2 代林养分循环速率比第 1 代快, 第 1 代林养分循环周期比第 2 代长。养分地球化学循环的速率越快, 意味着从外界输入到杉木林系统内的养分, 有些还来不及被林木吸收利用就有可能输出系统外了。外界输入到系统的养分在系统内滞留的时间愈长, 林木对它的吸收与利用的机会也愈多。从两代林的养分地球化学循环的速率和循环周期分析, 在系统滞留与利用外界输入的养分功能上, 第 2 代不如第 1 代林。第 2 代林这种养分地球化学循环功能对林木生长和土壤肥力水平的维持都是不利的。

4 结论与讨论

会同第 1 和第 2 代杉木林大气降雨中养分浓度均高于云南哀牢山山地常绿阔叶林 (2.271 g/kg)^[18] 和西藏南伊沟原始林芝云杉林 (1.208 g/kg)^[24]; 第 1 代杉木林大气降雨中养分浓度低于海南岛尖峰岭山地雨林 (3.620 g/kg)^[20] 和江西省大岗山杉木林 (3.558 g/kg)^[14], 第 2 代则高于它们。大气降水中的养分浓度差异, 可能与当地大气降水时天气状况有关外, 还与大气环境受污染的程度有关联, 云南哀牢山和西藏南伊沟地处我国边陲, 其大气污染程度比内地轻微些, 因此其大气降雨中养分浓度比大气环境受污染的程度较重的内地低。

穿透水中养分浓度, 会同第 1 代杉木林 (7.482 g/kg) 稍低于江西省大岗山第 1 代杉木林 (7.651 g/kg)^[14], 会同第 2 代杉木林 (8.871 g/kg) 与海南岛尖峰岭山地雨林 (8.640 g/kg)^[20] 差异不大; 两代林其浓度均高于云南哀牢山山地常绿阔叶林 (5.580 g/kg)^[18] 和西藏南伊沟原始林芝云杉林 (6.799 g/kg)^[24]。穿透水中养分浓度是大气降雨经林冠、灌冠截留和淋溶综合作用的结果, 其养分的浓度, 除了与降雨中养分多少有关外, 还与林分冠层密集度, 沉淀在林冠层中的尘埃物质, 以及林木地上营养器官所含各种养分物质量及其可溶程度有关联。

林冠层被雨水淋溶出来的养分, 有些研究者把它作为生物地球化学循环中的养分归还量^[21-22], 这点值得商讨。被雨水淋溶出来的物质可能是枝叶表面被淋溶代换出来的元素, 或者是林木蒸腾作用所带出积累在叶面的元素^[19]; 也有可能是来自聚结在细胞壁和角质层内某些营养物质, 降雨时它们被氢离子交换出来^[9]。当然以上面几种方式淋溶的养分应视为生物地球化学循环中的养分归还量。但是, 被淋溶出来的物质还包括两次降雨相隔的无雨天, 沉淀在冠层中的大气尘埃物质被淋洗出来的元素 (在城郊或车流量大的公路旁的森林, 这种情况更普遍)。这些养分应该是地球化学循环中的输入养分。

表 4 杉木人工林生态系统养分地球化学循环
Table 4 Geochemical circulation of nutrient elements in Chinese fir plantation ecosystem

林龄/a Stand age	项目 Items	第 1 代林 first Chinese fir plantation							第 2 代林 Second Chinese fir plantation							合计 Sum
		N	P	K	Ca	Mg	合计 Sum	N	P	K	Ca	Mg	合计 Sum			
17	降水养分输入/(kg hm ⁻² a ⁻¹)	5.00**	0.27a	10.05**	13.45**	3.66**	32.43	10.06**	0.28a	17.15**	18.12**	5.45**	51.06			
	径流养分输出/(kg hm ⁻² a ⁻¹)	0.90**	0.19a	1.88**	3.03**	3.26**	9.26	1.96**	0.19a	6.32**	11.09**	4.66**	24.26			
	净积累/(kg hm ⁻² a ⁻¹)	4.10**	0.08*	8.17**	10.42**	0.40**	23.17	8.10**	0.09*	10.83**	7.03**	0.79**	26.80			
	净积累率/%	82.00**	29.63**	81.29**	77.47**	10.92**	71.44	80.52**	32.14*	63.15**	38.80**	14.49**	52.57			
	循环率/%	18.00**	70.37**	18.71**	22.53**	89.02**	28.56	19.48**	67.86**	36.85**	61.20**	85.51**	47.43			
	循环周期/a	5.6**	1.4*	5.3**	4.4*	1.1*	3.5	5.1**	1.2**	2.7**	1.6**	1.2*	2.1			
18	降水养分输入/(kg hm ⁻² a ⁻¹)	4.54**	0.21*	10.36**	15.77**	3.59**	34.48	10.15**	0.22*	18.69**	15.04**	4.94**	49.04			
	径流养分输出/(kg hm ⁻² a ⁻¹)	0.92**	0.19*	1.86**	3.03**	3.24**	9.24	1.52**	0.18*	6.28**	10.22**	4.42**	22.62			
	净积累/(kg hm ⁻² a ⁻¹)	3.62**	0.02**	8.50**	12.74**	0.35**	25.23	8.63**	0.04**	12.41**	4.82**	0.52**	26.42			
	净积累率/%	79.73**	9.52**	82.05**	80.79**	9.75**	73.21**	85.02**	18.18**	66.40**	32.05**	10.53**	53.87			
	循环率/%	20.27**	90.48**	17.95**	19.21**	90.25**	26.79	14.98**	81.82**	33.60**	67.95**	89.47**	46.13			
	循环周期/a	4.9**	1.1**	5.6**	5.2**	1.1a	3.7	6.7**	1.2*	3.0**	1.5**	1.1a	2.2			
19	降水养分输入/(kg hm ⁻² a ⁻¹)	4.71**	0.20*	8.96**	12.91**	2.93**	29.72	7.64**	0.19*	15.06**	12.46**	4.24**	39.59			
	径流养分输出/(kg hm ⁻² a ⁻¹)	0.77**	0.17a	1.59**	2.62**	2.80**	7.95	1.32**	0.17a	4.39**	7.80**	3.82**	17.50			
	净积累/(kg hm ⁻² a ⁻¹)	3.94**	0.03**	7.37**	10.29**	0.13**	21.76	6.32**	0.02**	10.67**	4.66**	0.42**	22.09			
	净积累率/%	83.65**	15.00**	82.25**	79.71**	4.44**	73.25	82.72**	10.53**	70.85**	37.40**	9.91**	55.80			
	循环率/%	16.35**	85.00**	17.75**	20.29**	95.56**	26.75	17.28**	89.47**	29.15**	62.60**	90.09**	44.20			
	循环周期/a	6.1*	1.2*	5.6**	4.9**	1.1a	3.7	5.8**	1.1*	3.4**	1.6**	1.1a	2.3			
20	降水养分输入/(kg hm ⁻² a ⁻¹)	5.10**	0.22*	9.70**	13.98**	3.89**	32.89	7.74**	0.20*	15.28**	13.03**	3.56**	39.81			
	径流养分输出/(kg hm ⁻² a ⁻¹)	0.95a	0.20**	1.77**	3.35**	3.58**	9.85	0.94a	0.10**	3.89**	7.20**	3.39**	15.52			
	净积累/(kg hm ⁻² a ⁻¹)	4.15**	0.02**	7.93**	10.63**	0.31**	23.04	6.88**	0.10**	11.39**	5.83**	0.17**	24.29			
	净积累率/%	81.37**	9.09**	81.17**	76.04**	7.97**	70.05	88.89**	50.00**	74.54**	44.74**	4.77**	61.01			
	循环率/%	18.63**	90.91**	18.83**	25.96**	92.03**	29.95	11.11**	50.00**	25.46**	55.26**	95.23**	38.99			
	循环周期/a	5.4**	1.1**	5.4**	3.9**	1.1*	3.3	9.0**	2.0**	3.9**	1.8**	1.0*	2.7			
21	降水养分输入/(kg hm ⁻² a ⁻¹)	4.50**	0.21*	8.70**	13.27**	3.11**	29.79	8.70**	0.22*	15.25**	13.17**	3.82**	41.16			
	径流养分输出/(kg hm ⁻² a ⁻¹)	0.84**	0.18**	1.65**	2.62**	2.84**	8.13	0.90**	0.10**	3.99**	6.87**	3.47**	15.33			
	净积累/(kg hm ⁻² a ⁻¹)	3.66**	0.03**	7.05**	10.65**	0.27**	21.66	7.80**	0.12**	11.26**	6.30**	0.35**	25.83			
	净积累率/%	81.33**	14.29**	81.03**	80.28**	8.68**	72.78	89.66**	54.55**	73.84**	47.84**	9.16**	62.76			
	循环率/%	18.67**	85.71**	18.97**	19.72**	91.32a	27.22	10.34**	45.45**	26.16**	52.16**	90.84a	37.24			
	循环周期/a	5.4**	1.2**	5.4**	5.1**	1.1a	3.7	9.7**	2.2**	3.8**	1.9**	1.1a	2.7			
平均值 Average	降水养分输入/(kg hm ⁻² a ⁻¹)	4.77**	0.22a	9.55**	13.88**	3.44**	31.86	8.88**	0.22a	16.29**	14.36**	4.40**	44.15			
	径流养分输出/(kg hm ⁻² a ⁻¹)	0.88**	0.18**	1.78**	2.97**	3.14**	8.95	1.33**	0.15**	4.97**	8.64**	3.95**	19.04			
	净积累/(kg hm ⁻² a ⁻¹)	3.89**	0.04**	7.77**	10.91**	0.30**	22.91	7.55**	0.07**	11.32**	5.72**	0.45**	25.11			
	净积累率/%	81.55**	18.18**	81.36**	78.60**	8.72**	71.90	85.02**	31.82**	69.49**	39.83**	10.23**	56.87			
	循环率/%	18.45**	81.82**	18.64**	21.40**	91.28**	28.10	14.98**	68.18**	30.51**	60.18**	89.77**	43.13			
	循环周期/a	5.4**	1.2**	5.4**	4.7**	1.1a	3.6	6.7**	1.5**	3.3**	1.7**	1.1a	2.3			

差异显著性检验只对两代林同一龄时的降水量中同一种元素养分输入量,经流中养分输出量,养分净积累量,养分净积累率,养分循环率,养分循环周期之间的分析,它们之间小写字母相同为差异不显著($P \geq 0.05$), *表示显著($P < 0.05$), **表示极显著($P < 0.01$)

会同第 1 代杉木林地地表水中养分浓度 (10.255 g/kg) 与江西省大岗山第 1 代杉木林 (10.015 g/kg)^[14] 接近, 因为林分相同、结构特征相近, 成土母岩也相同 (变质的板 (页) 岩)^[14], 但会同第 2 代杉木林 (11.708 g/kg) 高于江西省大岗山的。无论是第 1 代还是第 2 代林都高于云南哀牢山山地常绿阔叶林 (7.766 g/kg)^[18]、西藏南伊沟原始林芝云杉林 (6.581 g/kg)^[24] 和海南岛尖峰岭山地雨林 (8.020 g/kg)^[20]。会同第 1 代杉木林地下水中养分浓度 (6.144 g/kg) 与西藏南伊沟原始林芝云杉林 (6.910 g/kg) 相近, 高于云南哀牢山山地常绿阔叶林 (3.972 g/kg) 和海南岛尖峰岭山地雨林 (5.110 g/kg)^[20]。径流中养分浓度的差异除生物因素外, 在相当程度上还受母岩类型及其化学成分的影响, 会同林分植物种类与西藏南伊沟、云南哀牢山和海南岛尖峰岭不同, 其植物组织所含各种养分有差异, 彼此成土母岩也不同^[18,20,24], 其化学成分也不一样, 因而造成其径流中养分浓度的差异。

养分地球化学循环功能, 第 2 代的养分净积累率只有第 1 代林的 73.57%—87.14%; 养分流失率是第 1 代林的 1.30—1.72 倍; 第 1 代林养分地球化学循环速率 26.75%—29.95%, 第 2 代林 37.24%—47.43%; 养分循环的周期第 1 代林 3.3—3.7 年, 第 2 代林 2.1—2.7 年, 第 2 代林养分积累的地球化学循环功能比第一代林弱。当然, 有可能如前面分析, 林木采伐过程造成两代林表层土壤物理性能的差异, 杉木连栽影响土壤酶的活性, 降低了第 2 代林土壤积累养分功能。然而, 究竟是什么原因导致第 2 代林养分地球化学循环功能减弱, 有待进一步研究与探讨。

杉木人工林连栽地力衰退和生产力下降问题一直是我国人工林持续经营研究的热点。众多学者从连栽不同代数杉木人工林木材蓄积量, 生物产量、土壤物理结构特征的差异、林地化学特性的变化、不合理的营林措施和栽培制度等方面探求杉木人工林连栽地力衰退和生长力下降的原因与机制。虽然本研究只分析了连栽第 1 和第 2 代杉木林近熟林阶段水文过程养分动态和养分地球化学循环功能, 但是, 研究的结果可为杉木人工林连栽生产力下降和地力衰退问题的研究提供依据和思路。

参考文献 (References):

- [1] Ebermayer E. Die Gesamte Lehre der Waldstreu Mit Rücksicht Auf Die Chemische Static Des Waldbaues. Berlin: Springer, 1876: 116-116.
- [2] Bazilevich N I, Rodin L Y. Geographical regularities in productivity and the circulation of chemical elements in the Earth's main vegetation types. Soviet Geography, 1971, 12(1): 24-53.
- [3] Cole D W, Gessel S P, Dice S F. Distribution and cycling of nitrogen, phosphorus, potassium and Calcium in a second-growth Douglas-fir ecosystem // Young H E. Symposium on Primary Productivity and Mineral Cycling in Natural Ecosystem. New York: University of Marne Press, 1968: 197-232.
- [4] Bormann F H, Likens G E. Pattern and Process in a Forested Ecosystem. New York: Springer-Verlag, 1981: 1-25.
- [5] Young H E. Symposium on Primary Productivity and Mineral Cycling in Natural Ecosystems. New York: University of Marne Press, 1967: 37-46.
- [6] Allen H L. Book reviews: forest nutrition management. Forest Science, 1987, 33(4): 1105-1106.
- [7] Chapin F S. The mineral nutrition of wild plants. Annual Review of Ecology and Systematics, 1980, 11: 233-260.
- [8] DeAngelis D L. Energy flow, nutrient cycling, and ecosystem resilience. Ecology, 1980, 61(4): 764-771.
- [9] 冯宗炜, 陈楚莹, 王开平, 张家武, 曾士余, 赵吉录, 邓仕坚. 亚热带杉木纯林生态系统中营养元素的积累、分配和循环的研究. 植物生态学与地植物学丛刊, 1985, 9(4): 245-256.
- [10] 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. 生态学杂志, 1992, 11(5): 1-6.
- [11] Yang Y S, Lin P, Guo J F, Lin R Y, Chen G S, He Z M, Xie J S. Litter production, nutrient return and leaf-litter decomposition in natural and monoculture plantation forests of *Castanopsis kawakamii* in subtropical China. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(7): 1278-1289.
- [12] 孙书存, 陈灵芝. 东灵山地区辽东栎叶养分的季节动态与回收效率. 植物生态学报, 2001, 25(1): 76-82.
- [13] 莫江明, Brown S, 孔国辉, 张佑昌, Lenart M. 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.
- [14] 马雪华. 在杉木林和马尾松林中雨水的养分淋溶作用. 生态学报, 1989, 9(1): 15-20.
- [15] 唐常源, 王翌. 湿地松人工林中降雨对养分物质的淋溶影响. 植物生态学与地植物学学报, 1992, 16(4): 379-383.
- [16] 彭培好, 王金锡, 胡振宇, 高华东. 人工桉柏混交林中降雨对养分物质的淋溶影响. 生态学杂志, 1996, 15(5): 12-15.
- [17] 盛炜彤. 杉木人工林水土流失及养分损耗研究. 林业科学研究, 2000, 13(6): 589-597.
- [18] 甘健民, 薛敬意, 谢寿昌. 云南哀牢山常绿阔叶林土壤渗漏水养分研究. 地理科学, 1997, 17(3): 237-242.

- [19] 潘维涛, 田大伦, 谌小勇, 文仕知. 亚热带杉木人工林生态系统的水文学过程和养分动态. 中南林学院学报, 1989, 9(增刊): 1-9.
- [20] 周光益, 陈步峰, 曾庆波, 吴仲民, 黄全, 李意德. 海南岛热带山地雨林短期水量平衡及主要养分的地球化学循环研究. 生态学报, 1996, 16(1): 18-32.
- [21] Gan J M, Xue J Y, Zhao H K. A preliminary study on change of nutrients import and export in the process of rainfall in the Ailao mountains region of Yunnan. *Journal of Natural Resource*, 1995, 10(1): 43-50.
- [22] Tian D L, Xiang W H. Nutrient characteristics in hydrological processes of Chinese fir plantation ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(7): 1370-1376.
- [23] 田大伦, 盘宏华, 康文星, 方海波. 第二代杉木林养分动态研究. 中南林学院学报, 2001, 21(3): 6-12.
- [24] 方江平, 项文化, 刘韶辉. 西藏南伊沟原始林芝云杉林水文学过程的水化学特征. 林业科学, 2010, 46(9): 15-19.
- [25] 潘维涛, 李利村, 高正衡, 张相琼, 唐东元. 杉木人工林生态系统中的生物产量及其生产力的研究. 湖南林业科技, 1978, (5): 6-10.
- [26] 杨超, 田大伦, 胡曰利, 闫文德, 方晰, 梁小翠. 连栽杉木林林下植被生物量动态格局. 生态学报, 2011, 31(10): 2737-2747.
- [27] 潘维涛, 田大伦, 文仕知, 廖家翔, 康文星, 雷志星. 森林生态系统物质循环研究中生物地球化学方法和实验技术. 中南林学院学报, 1984, 4(1): 18-28.
- [28] 田大伦, 赵坤. 杉木人工林生态系统凋落物的研究 1. 凋落物的数量、组成及动态变化. 中南林学院学报, 1989, 9(增刊): 38-44.
- [29] 宁晓波, 项文化, 王光军, 方晰, 闫文德, 邓湘雯. 湖南会同连作杉木林凋落物量 20 年动态特征. 生态学报, 2009, 29(9): 5122-5129.
- [30] 康文星, 田大伦, 方海波, 项文化. 第二代杉木人工幼林生态系统土壤水文学功能的研究. 中南林学院学报, 2000, 20(4): 1-5.
- [31] 康冰, 刘世荣, 蔡道雄, 卢立华, 何日明, 高妍夏, 迪玮峙. 南亚热带不同植被恢复模式下土壤理化性质. 应用生态学报, 2010, 21(10): 2479-2486.
- [32] 魏强, 凌雷, 柴春山, 张广忠, 闫沛斌, 陶继新, 薛睿. 甘肃兴隆山森林演替过程中的土壤理化性质. 生态学报, 2012, 32(15): 4700-4713.
- [33] 田大伦, 康文星, 文仕知. 杉木林生态系统学. 北京: 科学出版社, 2003: 285-295.