

黄土丘陵区主要林分生物量及营养元素生物循环特征

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. 中国科学院水土保持研究所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:以黄土丘陵区子午岭为研究区域,用标准木法和收获法对暖温带森林优势群落辽东栎林、油松林及刺槐人工林的生物量、营养元素生物循环量及循环特征进行了研究。结果表明:黄土丘陵区子午岭油松林、辽东栎林和刺槐人工林 3 林分总生物量为: 86.247、129.005 t/hm² 和 144.795 t/hm², 乔木层生物量分别为: 85.223、126.989 t/hm² 和 142.488 t/hm², 随群落针阔树种转化替代, 群落总生物量呈现明显的增加趋势。年均生长量为 3.275~5.699 t/hm²。生物量和年生长量排序为刺槐人工林>辽东栎林>油松林。3 林分林下植被层生物量、凋落物贮量表现为刺槐林>辽东栎林>油松林, 林下植被层生物量的差异主要是由林分郁闭度和林下凋落物的不同引起的; 刺槐林和辽东栎林林下植被层发达的根系和较高的凋落物量有利于提高土壤肥力、保持水土。同化器官的各种元素含量高于其它器官, 茎中营养元素的含量最低。乔木层营养元素积累量分别为: 0.745、1.378 t/hm² 和 1.805 t/hm²。不同林分不同营养元素的积累量差别较大。因采伐而引起的 3 林分林地养分流失量分别达 65.45%、53.76% 和 25.1%。3 林分林下植被层和凋落物层的营养元素积累量排序为: 刺槐林>辽东栎林>油松林。凋落物营养元素贮量高于南方常绿阔叶林和亚热带雨林, 但远低于华北针叶林。不同群落林下植被层和凋落物层之间营养元素的差异是由于生物种类和生物量的不同引起的。3 林分生态系统(包括 0~60cm 土层)营养元素总贮量为 32.953、296.479 t/hm² 和 340.624 t/hm²。0~60cm 土层营养元素现存量排序为刺槐林>辽东栎林>油松林; 系统各层次营养元素积累量排序为: 土壤层>>乔木层>凋落物层>林下植被层。土层中营养元素贮量占该系统总量的 96.10%~99.38%, 植被层和凋落物层的贮量仅占 0.49%~2.3% 和 0.13%~1.51%。3 林分营养元素年吸收量和年归还量排序为刺槐林>辽东栎林>油松林; 年存留量排序为: 辽东栎林>刺槐林>油松林; 吸收系数和循环系数排序为: 刺槐林>辽东栎林>油松林。油松林的利用系数是辽东栎林和刺槐林的 5.7 倍。富集系数排序为: 油松林>刺槐林>辽东栎林; 其中油松林的富集能力分别是刺槐林和辽东栎林的 4.28 和 4.8 倍。油松林较高的利用系数和富集系数决定了它具有较强的耐瘠性。

关键词: 辽东栎林; 油松林; 刺槐林; 生物量; 营养元素; 生物循环; 黄土高原; 子午岭

The bio-cycle patterns of nutrient elements and stand biomass in forest communities in Hilly Loess Regions

ZHANG Xi-Biao^{1,2}, SHANGGUAN Zhou-Ping^{2*} (1. Longdong University, QingYang Gansu 745000, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science, Yangling, Shaanxi 712100, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 527~537.

Abstract: By means of the standard-timber harvesting methods, the bicycled quantities and bio-cycle patterns of nutrient elements and the stand biomass in *Quercus liaotungensis* forest, *Pinus tabulaeformis* forest and artificial *Robinia pseudoacacia* forest, the dominant communities in warm temperate zones were studied with ZiWulin Mountain lying in Hilly Loess Regions as the research area. The results show that the total biomass, was 86.247 t/hm² in *Pinus tabulaeformis* forest, 129.005 t/hm² in *Quercus liaotungensis* forest and 144.795 t/hm² in *Robinia pseudoacacia* forest, and the arbor layer biomasses were 86.247, 129.005 and 144.795 t/hm² in the three forests, respectively; it appears that the total biomasses significantly increased as the

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(2002CB111502)

收稿日期: 2003-11-05; **修订日期:** 2004-05-20

作者简介: 张希彪(1963~), 男, 甘肃省武威市人, 副教授, 主要从事植被生态学和景观生态学教学研究。E-mail: zhangxibiao882@163.com

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

Foundation item: National State Key Basic Research and Development Plan (No. 2002CB111502)

Received date: 2003-11-05; **Accepted date:** 2004-05-20

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

forest communities transit from conifer species to broadleaf species. The mean annual growths ranged between 3.275 and 5.699 t/hm², and biomasses and annual growths stood in the order of artificial *Robinia pseudoacacia* forest > *Quercus liaotungensis* forest > *Pinus tabulaeformis* forest under the three stands, the vegetation biomasses and the litter amounts stood in the order of *Robinia pseudoacacia* forest > *Quercus liaotungensis* forest > *Pinus tabulaeformis* forest, which mainly resulted from the differences in stand closure and accumulative litters under forests; well-developed roots and abundant accumulative litters in the vegetation layers under *Robinia pseudoacacia* and *Quercus liaotungensis* forests were conducive to improving soil fertility and conserving soil and water. The contents of nutrient elements in assimilating organs were higher than those in other organs, and the contents of nutrient elements in stems were the lowest ones. The accumulative amounts of nutrient elements in the arbor layers of the three forests were 0.745, 1.378 and 1.805 t/hm². The accumulative amounts of nutrient elements differ very much among different forest stands. The nutrient losses resulting from felling in the three forests were 65.45%, 53.76% and 25.1%, respectively. The accumulative amounts of the vegetation and the litter under the three forest stands stood in the order of *Robinia pseudoacacia* forest > *Pinus tabulaeformis* forest > *Quercus liaotungensis* forest. The amounts of nutrient elements stored in the vegetation and the litter concerned were higher than those in ever-green broadleaf forests in south China and rainforests in subtropical zones but much lower than those in coniferous forests in North China. The differences in nutrient elements contained in the vegetation and the litter under the three forest stands were due to different species and biomasses of living things. The total amounts stored in the three forest ecosystems were 32.953, 296.479 and 340.624 t/hm², respectively. The amounts of nutrient elements existing in 0~60 cm soil stood in the order of *Robinia pseudoacacia* forest > *Quercus liaotungensis* forest > *Pinus tabulaeformis* forest. The accumulative amounts of nutrient element in the different layers of each ecosystem stood in the order of soil layer >> arbor layer > litter-layer > ground layer under forest stands. The amounts of nutrient elements stored in the soils of the ecosystems accounted for 96.10%~99.38%, while the amounts of nutrient elements in the vegetations and litters under its forest stands only accounted for 0.49%~2.30% and 0.13%~1.51%. The amounts of nutrient annually elements taken in from and annually released to soil by the three forest stands stood in the order of *Robinia pseudoacacia* forest > *Quercus liaotungensis* forest > *Pinus tabulaeformis* forest; the amounts of nutrient elements annually retained in the stands stood in the order of *Quercus liaotungensis* forest > *Robinia pseudoacacia* forest > *Pinus tabulaeformis* forest; and the taking-up and cycling coefficients of nutrient elements stood in the order of *Robinia pseudoacacia* forest > *Quercus liaotungensis* forest > *Pinus tabulaeformis* forest. The use coefficient in *Pinus tabulaeformis* forest was 5.7 times as much as those in *Quercus liaotungensis* forest and *Robinia pseudoacacia* forest. The enrichment coefficient of nutrient elements in the three forests ranked in the order of *Pinus tabulaeformis* forest > *Quercus liaotungensis* forest > *Robinia pseudoacacia* forest; the enrichment capacity of nutrient elements in *Pinus tabulaeformis* forest was 4.28 and 4.8 times as much as those in *Robinia pseudoacacia* forest and *Quercus liaotungensis* forest, respectively. The higher use and enrichment coefficients of nutrient elements in *Pinus tabulaeformis* forest determined that it had stronger tolerance to soil barrenness.

Key words: *Quercus liaotungensis* forest; *Pinus tabulaeformis* forest; Artificial *Robinia pseudoacacia* forest; biomass; nutrient elements; biologic cycle; the Loess Plateau; Ziwulin Mountain

文章编号:1000-0933(2005)03-0527-11 中图分类号:S792.14 文献标识码:A

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经被破坏殆尽,区域性生态环境十分脆弱,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、提高生态系统生产力。但目前该区植被生态建设面临许多问题,人工植被群落的系统生产力逐渐降低,景观特征呈现退化迹象^[1~5]。同时立地条件恶化,出现了土壤水分的低湿层和利用性干层等使得人工林草植被的进一步发育演化受到阻碍^[6~8]。植物群落生物量是研究森林物质生产和群落养分动态的基础,是反映群落结构与功能的主要标志之一^[9~16],而营养元素循环作为森林生态系统基本功能过程之一,是系统生产力及持久性的决定因素^[17,18,20~24]。因此,阐明不同生态类型区主要森林植被类型的生物量、生产力和营养元素的循环特征是植物生态学和恢复生态学的主要研究内容之一^[19]。

刺槐(*Robinia pseudoacacia*)和油松(*Pinus tabulaeformis*)等树种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,生长快,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首选树种,在黄土高原地区已占有相当比例^[5,6]。但由于刺槐人工林和油松林的面积和密度较大,其林地生产力的维

持、土壤水环境的改善以及乔木可持续生长成为林草植被建设中需要解决的主要问题。有关油松林和刺槐人工林地水分、养分问题研究有过不少报道^[13,18,21~24,29~31],但对它们在黄土丘陵区的生物生长量及其生态系统养分循环量的特征尚无系统研究。为此,以黄土高原丘陵区的子午岭为研究区域,对地带性演替顶级群落辽东栎(*Quercus liaotungensis*)林、亚顶级群落油松林以及刺槐人工林在相同立地条件下的生物量、净初级生产力、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正宁中湾林场,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。坡度大多在 15°~35°之间。地处中纬度地带,具有明显的大陆性气候特征,属暖温带冷凉半湿润气候区。该地区多年平均气温 8.3℃,降水量 623.5mm,其中 7~9 月份降水占到 63%,年蒸发量 1500.8mm,干燥度 0.97,空气相对湿度 60%~70%;年日照时数 2200~2400h;无霜期 163d。阳坡荒山主要分布有山地黄土,沟谷地带为红胶土;阴坡、半阴坡以栗钙土为主,黑垆土主要分布于残塬和川台地上;梁峁、沟壑坡面的农田和荒地主要是黄绵土。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。由于相对高差不大,森林植被的垂直分布不明显,但因地形受长期流水的侵蚀而形成很多的沟谷,导致生态环境的不断变化,使森林植被的水平分布变得较为复杂^[19]。

1.2 研究区的群落学特征

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^[19]。群落分层次分化明显,乔木、灌木、草本和活地被层发育完整,且具丰富的层间植物。乔木层被分为两个亚层,第一亚层高度 12~18m,主要有辽东栎、油松、山杨(*Populus davidiana*)、漆树(*Toxicodendron verniciflum*)、椴树(*Tilia* sp.)、桦木(*Betula* sp.)等大乔木组成;第二亚层高度 5~11m,主要由鹅耳枥(*Carpinus* sp.)、青榨槭(*Acer davidii*)、木姜子(*Litsea* sp.)、少脉椴(*T. paucicostata*)等小乔木构成,郁闭度 0.7~0.85。灌木层优势种高度 50~180cm,盖度 50%~70%。主要有虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、黄刺玫(*Rose xanthina*)、土庄绣线菊(*Spiraea pubescens*)、几种忍冬(*Lonicera* sp.)、毛樱桃(*Prunus tomentosa*)、茶条槭(*A. ginnala*)、水栒子(*Cotoneaster multiflorus*)、陕西荚蒾(*Viburnum schensianum*)、鞘柄菝葜(*Smilax stans*)、胡枝子(*Lespedeza* sp.)及蔷薇属(*Rosa* sp.)等。草本层优势种高度 30~80cm,盖度 40%~60%。主要有披针苔草(*Carex lanceolata*)、唐松草(*Thalictrum* sp.)、鹿蹄草(*Pyrola rotundifolia*)、糙苏(*Phlomis umbrosa*)、茜草(*Rubia cordifolia*)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)等。层间植物有南蛇藤(*Celastrus orbiculatus*)、乌头叶蛇葡萄(*Ampelopsis aconitifolia*)、杠柳(*Periploca sepium*)、铁线莲属植物(*Clematis* sp.)等。刺槐人工林在该区被作为主要造林树种而有大量分布。

1.3 研究方法

1.3.1 乔木层生物量测定 测定林分生物量的现存量 and 生产力,用标准地-标准木-分层切割法。在研究区海拔 1650~1700m 的范围内,选择坡向(为阴坡、半阴坡)、坡位(中上坡位)、坡度(18°~25°)等立地条件相近的区域,分别设置面积为 667m² 的标准样地,以避免以小地形变化对土壤水热状况所带来的较大影响。对标准地进行每木检尺,确定平均标准木和径阶标准木。将标准木伐倒,采用 Monsic 分层切割法测定林木生物量的现存量。

1.3.2 林下地被物生物量测定 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测定。同时,在同一地点进行土壤分层(0~20cm、20~40cm、40~60cm)取样,进行养分含量等指标的测定。

1.3.3 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 3h,准确称样,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;P 用钼锑钒分光光度法测定;K 用火焰光度计法测定;Ca、Mg 用干烧法灰化原子吸收分光光度法测定。

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 Na₂CO₃ 碱焙烧-原子吸收分光光度法测定。

2 结果与讨论

2.1 子午岭 3 林分群落的生物量特征

2.1.1 3种林分群落生物量和生产力及其分配规律 根据每个树种的标准木资料,以胸径平方与树高之积(D^2H)作为自变量,对3个树种及整个林分各器官的生物量和生长量加以拟合,建立优化回归模型,以此作为估算生物量和年生长量的基础。结果表明,随着森林群落从针叶林向阔叶林的正向演替,3个群落总的生物量由86.247t/hm²(26龄油松林)增加到129.005 t/hm²(25龄辽东栎林)和144.795t/hm²(25龄刺槐人工林);其中乔木层的生物量由85.223t/hm²增加到126.989 t/hm²和142.488 t/hm²(表1),乔木层生物量分别占各群落总生物量的98.81%,98.44%和98.41%。刺槐林的生物量是油松林的1.67倍。其各器官生物量的分配比例为茎干(50.27%)>根(21.21%)>枝(14.79%)>皮(11.01%)>叶(5.43%)。3林分乔木层生物量现存量 and 木材蓄积量的平均值分别为118.237t/hm²和117.679m³/hm²。年均生长量为4.686t/(hm²·a),以刺槐林的年均生长量和蓄积量最高,分别达5.699t/(hm²·a)和5.493m³/(hm²·a),其次为辽东栎林,油松林最低。这一顺序与林分起源、树种特性、各林分的生长发育时期及林分密度等有关。研究区3林分的生物量与黄土高原区相同林龄的生物量相当^[5,21],但低于北京东灵山地区的生物量。北京东灵山辽东栎林的净初级生产力在5~24 t/(hm²·a)之间^[13]。可见,本地区辽东栎林的净初级生产力较低。

林下植被是森林群落结构的重要组成部分,有重要的群落学作用和生态功能^[14,32~34],其水土保持和地力维持与恢复的作用越来越受到人们的重视。油松林、辽东栎林和刺槐人工林的林下植被层总生物量现存量分别为1.014 t/hm²、2.016 t/hm²和2.307t/hm²,分别占群落总生物量的1.18%、1.57%和1.59%。不论是每公顷的绝对重量,还是所占群落生物量的百分数,都表现为人工林(刺槐)>阔叶林(辽东栎)>针叶林(油松)。这可能与森林群落的郁闭度和林下凋落物等因素有关^[14]。油松林林下土壤瘠薄,凋落物主要以针叶为主,较难腐烂分解;而辽东栎群落为硬阔叶林,加之林下受到阳光不足的限制,林下层难以得到充分发展。刺槐林郁闭度较低,其凋落物易分解。3林分灌木层及层间植物、草本茎叶和根系的生物量分别为0.630、0.279t/hm²和0.982t/hm²;油松林、辽东栎林和刺槐林林下植被层根系的生物量所占比例分别达25.6%、52.8%和51.7%,表明刺槐林和辽东栎林林下植被层具有发达根系,对水土保持有很重要的意义。

表 1 子午岭森林群落生物量、年均生物量和材积蓄积量
Table 1 Biomass and growing stock of forest community in Ziwouling Mountain

林分类型 Forest types	层次 Layers	生物量 Biomass (t/hm ²)						蓄积量 Volume (m ³ /hm ²)
		干 Bole	皮 Bark	枝 Branches	叶 Leaves	根 Roots	合计 Total	
油松林 Chinese Pine	乔木层 Arbor layer	45.118 (52.94)	6.511 (7.64)	14.637 (17.09)	8.331 (9.77)	14.836 (17.41)	85.233	89.407
	灌木层及层间植物 Shrub and inter-layer	0.525 (71.04)	—	—	—	0.214 (28.96)	0.739	
	草本层 Herb layer	0.142 (51.64)	—	—	—	0.133 (48.36)	0.275	
辽东栎林 Oak.	乔木层 Arbor layer	62.808 (49.46)	16.743 (13.19)	18.154 (14.30)	3.373 (2.66)	30.017 (23.64)	126.989	126.312
	灌木层及层间植物 Shrub and inter-layer	0.652 (54.57)	—	—	—	0.543 (45.44)	1.195	
	草本层 Herb layer	0.322 (39.22)	—	—	—	0.499 (60.78)	0.821	
刺槐林 Locust	乔木层 Arbor layer	68.959 (48.40)	17.403 (12.21)	18.449 (12.98)	5.511 (3.87)	32.168 (22.58)	142.488	137.319
	灌木层及层间植物 Shrub and inter-layer	0.714 (53.36)	—	—	—	0.624 (46.64)	1.338	
	草本层 Herb layer	0.372 (38.39)	—	—	—	0.592 (61.09)	0.919	
年均生物量 Mean annual biomass (t/(hm ² ·a))								材积蓄积量 Growing stock
油松林 Chinese Pine		1.735	0.250	0.563	0.320	0.571	3.278	3.439
辽东栎林 Oak.		2.512	0.669	0.726	0.135	1.201	5.079	5.053
刺槐林 Locust		2.758	0.696	0.738	0.221	1.287	5.699	5.493
平均值 Average		2.335	0.539	0.676	0.225	1.019	4.686	4.661

括号内的数字表示占该层生物量的百分数 Values in parentheses are percentage for biomass of each layer

2.1.2 3林分林下凋落物现存量 林下凋落物是森林生态系统水分循环与养分循环功能得以实现的主要调节器。在林地特别是侵蚀地中凋落物不仅对地表起到良好的覆盖作用、改善林地小气候、减缓地表径流、保持水土,也影响着森林的更新及幼苗生长^[25~29,33]。森林凋落物的贮量受林分组成、结构、密度、林龄及树种的生物学特性的影响,也与其林下植被的盖度有关。子午岭

3 林分林下凋落物现存量平均为 11.187t/hm²(表 2),年凋落物均值为 4.920t/hm²,其中未分解层和分解层分别占 55.96%和 44.34%。3 林分未分解层贮量差别不大,但刺槐人工林和辽东栎林群落凋落物分解层蓄积量分别是油松林群落的 1.68 倍和 1.42 倍。林下凋落物层的积累量主要由年凋落物量及其分解速率控制,而分解速率受凋落物种类和林地的水热状况限制。凋落物现存量、林下凋落物层的积累量和分解速率均表现为刺槐林>辽东栎林>油松林。据此可以推断刺槐林和辽东栎林表层土壤的肥力高于油松林地,而且刺槐人工林的水土保持效应比油松林高。在森林采伐作业时,保持枯落物层不被破坏,对防止水土流失具有决定性的意义。

2.2 子午岭 3 林分生态系统营养元素分布格局

2.2.1 植物分室各器官主要营养元素含量 植物中营养元素的分布特征一方面反映了植物自身的特性,是植物长期演化的结果;另一方面,受到所处生境的影响,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^[18,19,22~24]。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。研究表明:子午岭 3 林分不同器官主要营养元素相对浓度存在明显差异(表 3),其中同化器官树叶的各种元素浓度高于除花果外的其它器官,干中营养元素浓度最低。刺槐林各器官 N 素浓度高于辽东栎林和油松林,但由于刺槐具有固 N 作用,所以对土壤 N 素的需求并不高,而各器官 P 素浓度低于辽东栎和油松,可以推断刺槐对土壤肥力要求较低。刺槐干和皮中 Ca 的含量远高于辽东栎和油松。刺槐采伐利用过程中,干和皮营养元素几乎不可能再进入采伐基地,参与生态系统的营养元素再循环。因此,刺槐林多代连作势必导致营养元素的大量流失,从而引起土壤理化性质的改变并导致林地生产力下降^[22,30~32]。

2.2.2 乔木层营养元素积累量 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^[22~24]。林木营养元素的积累与分配主要决定于林木生物量的积累(现存量)及其各组分中营养元素的含量。子午岭 3 林分乔木层营养元素积累量分别为 0.745t/hm²(油松)、1.378 t/hm²(辽东栎)和 1.805 t/hm²(刺槐),占该林分生物量的 0.88%、1.09%和 1.27%,而且各器官营养元素积累量也存在明显的差异(表 4)。植物体内不同组分的营养元素浓度差异主要是由于植物体内各组分生理活性不同引起。但组分营养元素浓度的差异并非造成各组分营养元素贮量间差异较大的主要原因,而是由于不同组分间生物量的差异所致^[34]。例如,刺槐在树干和叶中 N 素的贮量分别为 195.085 t/hm²和 112.314 t/hm²,前者约是后者的 1.74 倍,但叶中 N 的浓度却约是树干的 7.21 倍。

表 2 子午岭 3 林分凋落物蓄积量

Table 2 Standing litterfalls stock in litterfalls layer of three forests in Ziwuling Mountain

林分类型 Forest types	凋落物蓄积量 Standing litterfalls stock(t/hm ²)			合 计 Total
	年凋落量 Annual litterfalls	未分解层 Undecomposed layer	分解层 Decomposed layer	
油松林 Chinese Pine	3.427	5.225	3.824	9.049
辽东栎林 Oak.	5.258	6.463	5.412	11.875
刺槐林 Locust	6.029	6.214	6.423	12.637
平均值 Average	4.920	5.967	5.220	11.187

表 3 子午岭 3 林分各器官营养元素含量

Table 3 Nutrient element contents in different organs of three forests in Ziwuling Mountain

器官 Organs	林分类型 Forest types	营养元素含量 Nutrient element contents (g/kg)				
		N	P	K	Ca	Mg
叶 Leaves	油松林 Chinese Pine	10.244	1.330	6.870	5.925	1.194
	辽东栎林 Oak.	19.731	1.986	5.524	7.833	2.516
	刺槐林 Locust	20.380	0.970	7.506	9.382	3.771
枝 Branches	油松林 Chinese Pine	4.215	0.562	4.693	4.672	0.728
	辽东栎林 Oak.	2.472	0.384	3.881	4.470	0.423
	刺槐林 Locust	7.251	0.480	0.862	5.772	0.573
干 Bole	油松林 Chinese Pine	0.912	0.121	0.691	0.804	0.093
	辽东栎林 Oak.	1.980	0.205	1.786	2.853	0.361
	刺槐林 Locust	2.829	0.206	0.270	3.831	0.327
皮 Bark	油松林 Chinese Pine	3.452	0.411	2.387	3.694	0.812
	辽东栎林 Oak.	4.641	0.510	3.252	11.324	1.245
	刺槐林 Locust	5.122	0.661	3.984	15.316	2.121
根 Roots	油松林 Chinese Pine	2.672	0.413	2.670	2.474	0.543
	辽东栎林 Oak.	0.675	0.162	1.525	1.921	0.334
	刺槐林 Locust	4.825	0.388	1.317	3.125	0.527

由于森林采伐而造成森林生态系统中营养元素的损失是不可避免的。本研究表明,若乔木层地上部分皆伐,从林地中所带走的营养量分别为 187.686 kg/hm²(油松)、901.976 kg/hm²(辽东栎)和 970.426 kg/hm²(刺槐),占营养元素积累量的 25.1%、65.45%和 53.76%。特别是由于 Ca 和 Mg 的大量流失,而引起辽东栎林和刺槐林地土壤偏酸性,破坏土壤原有离子的动态平衡,使其生产潜力下降^[23,24,30~32]。因此在林业生产过程中选择只取走树干而在林地中留下其它部分,让其自然分解使营养元素得以重新归还利用,将显著的减少营养元素的损失,对于森林生态系统的营养循环和维持地力具有重要意义。

表 4 子午岭 3 林分乔木层营养元素的积累量

Table 4 Nutrient element accumulation in arbor layer of three forests in Ziwulin Mountain

器官 Organs	林分类型 Forest types	营养元素含量 Nutrient element contents(kg/hm ²)					合计 Total
		N	P	K	Ca	Mg	
叶 Leaves	油松林 Chinese Pine	85.309	11.080	57.234	49.320	9.914	212.857
	辽东栎林 Oak.	66.549	6.679	18.619	26.411	8.466	126.724
	刺槐林 Locust	112.314	5.346	41.366	51.704	20.782	231.512
枝 Branches	油松林 Chinese Pine	61.622	8.197	68.648	68.355	10.539	217.359
	辽东栎林 Oak.	44.840	6.899	70.438	81.148	7.625	210.949
	刺槐林 Locust	133.774	8.856	15.903	106.488	10.571	275.591
干 Bole	油松林 Chinese Pine	41.057	5.414	31.131	36.094	4.061	117.758
	辽东栎林 Oak.	124.360	12.562	111.798	179.191	22.674	450.585
	刺槐林 Locust	195.085	14.206	18.619	264.182	22.549	514.641
皮 Bark	油松林 Chinese Pine	22.463	2.669	15.496	24.026	5.274	69.928
	辽东栎林 Oak.	77.688	8.5389	54.415	289.989	20.761	451.391
	刺槐林 Locust	89.103	11.486	69.264	249.034	36.894	455.785
根 Roots	油松林 Chinese Pine	39.642	6.127	39.612	36.660	8.056	130.097
	辽东栎林 Oak.	20.262	4.086	45.746	57.693	10.026	138.591
	刺槐林 Locust	155.211	12.481	42.366	100.525	16.953	327.536
合 计 Total	油松林 Chinese Pine	250.064	33.443	212.121	214.439	37.798	747.868
	辽东栎林 Oak.	333.698	39.540	300.895	634.372	69.552	1378.057
	刺槐林 Locust	685.487	52.374	187.517	771.936	107.745	1805.063

- 2.2.3 林下植被层营养元素积累量** 子午岭 3 林分林下植被层营养元素积累量分别为 40.628、87.750kg/hm² 和 89.425 kg/hm²(表 5),其大小排序为刺槐林>辽东栎林>油松林。3 林分林下植被层营养元素含量存在一定的差异,油松林群落林下植被层营养元素含量排序为:K(39.08%)>N(29.10%)>Ca(22.76%)>Mg(5.25%)>P(3.83%);辽东栎林群落营养元素含量排序为:Ca(40.94%)>K(29.26%)>N(20.90%)>Mg(5.94%)>P(2.86%);刺槐林群落营养元素含量排序为:Ca(37.71%)>K(29.77%)>N(23.91%)>Mg(6.01%)>P(2.59%),这种差异主要是构成林下植被的种群不同所致。
- 2.2.4 凋落物层营养元素积累量** 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,储存了大量的营养物质,是森林土壤自然肥力的重要来源^[17,18,20,27]。植物凋落物分解过程中每年释放的营养元素可满足 69%~87%的森林生长所需量^[26,27]。子午岭 3 林分林下凋落物层贮存了大量营养元素(表 5),其中含量最丰富的是 Ca 200.185kg/hm²,其余依次是 N 167.058kg/hm²、K 55.309kg/hm²、Mg 29.813kg/hm² 和 P 9.710kg/hm²。林下凋落物营养元素贮量高于南方常绿阔叶林(kg/hm²)(鼎湖山,Cg 17.38,N 102.08,K 48.94,Mg 36.45,P 4.33)^[33]和亚热带雨林(kg/hm²)(福建和溪,Ca 28.8,N 87.04,K 40.8,Mg 36.45,P3.28)^[35];但远低于华北针叶林(kg/hm²)(落叶松,Ca 336.4,N 360.1,K 173.3,Mg 69.5,P 31.7)^[36]。森林所处的地理位置对林下凋落物养分储量有较大的影响。子午岭阔叶林群落凋落物层营养元素积累量明显高于针叶林。阔叶林枯落物含有较丰富的营养元素,它们又比针叶林容易矿化;而且阔叶林中多形成使团粒结构多、肥力较高的柔软死地被物。针叶林中多形成使土壤肥力较低的粗糙死地被物。因而,阔叶林更容易积累土壤养分,有利于土壤肥力的提高和持续,并最终影响到群落的稳定性。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生物学特性及其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^[22]。
- 2.2.5 林地土层中营养元素贮量** 3 林分 0~60cm 土层营养元素现存量分别为 31.667、294.631t/hm² 和 338.222 t/hm²(表 6),其中刺槐林地营养元素贮量是辽东栎林和油松林的 1.15 倍和 10.68 倍。不同林分不同土层营养元素现存量也有较大的差异,3 林分 0~20cm 土层中营养元素的贮量分别占该林分 0~60cm 土层养分总量的 37.09%、19.22%和 29.29%;20~40cm 变幅为 34.30%~36.70%之间,差别不大。可见油松林地营养元素主要集中在表层,而辽东栎林和刺槐林的养分主要集中在中下层,这是因为刺槐和辽东栎的根系主要分布在表层土壤,对土壤表层元素的吸收量大所造成的,反映了植被与土壤长期相互作用及其协同进化的结果^[18,30,31]。
- 2.2.6 3 林分生态系统营养元素积累量及其空间分布** 3 林分生态系统(包括 0~60cm 土层)5 种营养元素总贮藏量为 32.953

~340.624 t/hm²(表 7),刺槐林>辽东栎林>油松林。其中土壤库营养元素贮量占系统总贮量的 96.10%~99.38%,植被层和凋落物层的营养元素积累量仅占 0.49%~2.39%和 0.13%~1.51%。系统各层次营养元素积累量的排序为:土壤层>>乔木层>凋落物层>林下植被层。土壤层是该生态系统营养元素的主要贮存库,在森林生态系统物质循环中起着十分重要的作用^[17,18,21,22]。地上与地下同一组分各营养元素贮量变化规律具有明显的差异,而不同林分营养元素贮量变化的规律也不尽相同。

表 5 子午岭 3 林分林下植被层和凋落物层营养元素的积累量

Table 5 Nutrient element accumulation in forest floor and litterfalls layers of three forests in Ziwuling Mountain							
层 次 Layers	林分类型 Forest types	营养元素积累量 Nutrient element accumulation (kg/hm ²)					
		N	P	K	Ca	Mg	合计 Total
林下植被层 Forest floor layer	油松林 Chinese Pine	11.821	1.554	15.876	9.245	2.132	40.628
	辽东栎林 Oak.	18.431	2.512	25.671	35.923	5.213	87.750
	刺槐林 Locust	21.382	2.312	26.624	33.725	5.382	89.425
	均值 Average	17.211	2.126	22.724	26.297	4.242	72.601
凋落物层 Litterfalls layer	油松林 Chinese Pine	108.431	9.125	34.782	211.331	16.521	380.200
	辽东栎林 Oak.	189.321	10.881	76.724	185.125	36.375	498.400
	刺槐林 Locust	203.423	9.125	54.421	204.121	36.542	507.611
	均值 Average	167.058	9.710	55.309	200.185	29.813	462.070

表 6 子午岭 3 林分林下土壤层营养元素的现存量

Table 6 The existing nutrient elements in soil layer of three forests in Ziwuling Mountain							
土层(cm) Soil layers	林分类型 Forest types	营养元素积累量 Nutrient element accumulation (kg/hm ²)					
		N	P	K	Ca	Mg	合计 Total
0~20	油松林 Chinese Pine	3085.102	185.272	1698.781	6235.451	542.225	11746.613
	辽东栎林 Oak.	5826.312	848.547	13075.552	32539.621	4327.452	56617.311
	刺槐林 Locust	8626.428	1128.825	46675.231	38425.824	4235.661	99091.812
20~40	油松林 Chinese Pine	3961.285	228.410	1265.365	5009.881	398.438	10861.662
	辽东栎林 Oak.	4751.492	965.154	25248.292	32913.862	42579.472	106457.942
	刺槐林 Locust	4912.513	1258.742	38245.273	38440.661	41257.725	124114.751
40~60	油松林 Chinese Pine	1652.331	834.773	1245.615	4870.129	458.311	9059.824
	辽东栎林 Oak.	3845.443	1208.472	30041.752	41523.540	54937.671	131555.981
	刺槐林 Locust	3471.212	1287.252	29470.632	39751.441	41036.338	115015.522
合 计 Total	油松林 Chinese Pine	8698.110	1247.237	4208.751	16114.471	1398.231	31666.643
	辽东栎林 Oak.	14423.125	3022.121	68364.712	106976.923	101844.104	294631.152
	刺槐林 Locust	17009.912	3674.722	114390.423	116617.481	86529.625	338222.455

2.2.7 主要营养元素的生物循环量及循环特征 生物循环是森林土壤和植物间营养元素的流动过程,是通过林木及林下植被的吸收、存留和归还 3 个不同的生理生态学过程来维持平衡^[23~26,31~34]。3 林分营养元素生物循环各具特色(表 8),营养元素年吸收量分别为 189.26、322.89kg/hm² 和 332.592 kg/hm²,年归还量分别为 79.80、190.03kg/hm² 和 161.712 kg/hm²,N 和 P 的年吸收量和年归还量为刺槐林>辽东栎林>油松林,而 K、Ca 和 Mg 年吸收量和年归还量为辽东栎林>刺槐林>油松林。油松林的年吸收量和年归还量都较低,说明油松林是一种耐瘠薄的树种。3 林分营养元素年存留量分别为 109.46、132.86kg/hm² 和 170.88kg/hm²,其中 N、P、K 和 Mg 年存留量为刺槐林>辽东栎林>油松林,Ca 的年存留量为辽东栎林>刺槐林>油松林。

生态系统养分循环的特点可以通过吸收系数、利用系数及循环系数来表征。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。吸收系数为油松林>辽东栎林>刺槐林(表 9)。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,该系数越大,则表明目前植物对该养分元素的贮存能力越大。油松林的利用系数是辽东栎林和刺槐林的 5.7 倍。富集系数表征植物元素含量与土层中元素含量的关系,体现双方共同作用、互相影响的结果。富集系数为油松林>刺槐林>辽东栎林;其中油松林的富集能力分别是刺槐林和辽东栎林的 4.28 和 4.8 倍。油松林的吸收系数、利用系数和富集系数均高于辽东栎林和刺槐林。循环系数是单位时间、单位面积植物归还量与相应吸收的量之比,反映了元素在循环过程中的残留量大小,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。循环系数排序为辽东栎林>刺槐林>油松林,可见辽东栎林和刺槐林不仅对林地营养元素要求比油松林高,而且营养元素的循环速率较油松林快^[23,32,34]。

表 7 子午岭 3 林分各层次营养元素的积累量

Table 7 Nutrient element accumulation in different layers of three forests in Ziwuling Mountain							
层次 Layers	林分类型 Forest types	营养元素积累量 Nutrient element accumulation (kg/hm ²)					
		N	P	K	Ca	Mg	合计 Total
乔木层 Arbor layer	油松林 Chinese Pine	250.064	33.443	212.121	214.439	37.798	747.868
	辽东栎林 Oak.	333.698	39.543	300.895	634.372	69.552	1378.057
	刺槐林 Locust	685.487	52.373908	187.517	771.936	107.745	1805.063
林下植被层 Forest floor layer	油松林 Chinese Pine	11.821	1.554	15.876	9.245	2.132	40.628
	辽东栎林 Oak.	18.431	2.512	25.671	35.923	5.213	87.752
	刺槐林 Locust	21.382	2.312	26.624	33.725	5.382	89.425
凋落物层 Litterfalls layer	油松林 Chinese Pine	189.321	10.881	76.724	185.125	36.375	498.400
	辽东栎林 Oak.	108.431	9.125	34.782	211.331	16.521	380.200
	刺槐林 Locust	203.423	9.125	54.421	204.153	36.542	507.611
土壤层 Soil layer(0~60cm)	油松林 Chinese Pine	8698.124	1247.192	4208.724	16114.36	1398.158	31666.558
	辽东栎林 Oak.	14423.122	3022.125	68364.773	106976.921	101844.444	294631.132
	刺槐林 Locust	17009.911	3674.712	114390.434	116617.463	86529.681	338222.214
系统合计 Total	油松林 Chinese Pine	9149.334	1293.074	4513.445	16523.169	1474.463	32953.454
	辽东栎林 Oak.	14885.660	3073.177	68726.048	107858.526	101935.686	296479.107
	刺槐林 Locust	17920.192	3738.511	114658.962	117627.161	86679.269	340624.099

表 8 子午岭 3 林分生态系统主要营养元素的生物循环量

Table 8 Biologic cycling volume of nutrient element for three forests in Ziwuling Mountain							
项目 Items	林分类型 Forest types	营养元素量 Nutrient element accumulation (kg/(hm ² · a))					
		N	P	K	Ca	Mg	合计 Total
吸收量 Annual absorption	油松林 Chinese Pine	61.316	6.335	40.225	68.048	13.361	189.265
	辽东栎林 Oak.	90.173	8.151	50.093	157.561	16.925	322.894
	刺槐林 Locust	111.182	9.575	41.222	152.541	18.082	332.592
归还量 Annual return	油松林 Chinese Pine	29.854	2.551	11.425	30.814	5.176	79.823
	辽东栎林 Oak.	51.732	4.684	24.677	98.248	10.712	190.031
	刺槐林 Locust	59.782	7.014	18.491	66.872	9.565	161.712
存留量 Annual retention	油松林 Chinese Pine	31.462	3.784	28.856	37.232	8.194	109.465
	辽东栎林 Oak.	38.443	3.472	25.423	59.326	6.214	132.864
	刺槐林 Locust	51.424	2.561	22.734	85.672	8.521	170.882

表 9 子午岭 3 林分生态系统主要营养元素的生物循环特征参数

Table 9 The biologic cycling characteristic parameters of nutrient elements for three forests in Ziwuling Mountain							
项 目 Items	林分类型 Forest types	营养元素 Nutrient elements					
		N	P	K	Ca	Mg	合计 Total
吸收系数 Absorption coefficient	油松林 Chinese Pine	0.0075	0.0051	0.0096	0.0042	0.0096	0.2531
	辽东栎林 Oak.	0.0063	0.0027	0.0007	0.0015	0.0002	0.2343
	刺槐林 Locust	0.0066	0.0026	0.0004	0.0013	0.0002	0.1843
利用系数 Utilization coefficient	油松林 Chinese Pine	0.0067	0.0049	0.0089	0.0041	0.0091	0.0057
	辽东栎林 Oak.	0.0061	0.0027	0.0007	0.0015	0.0002	0.0011
	刺槐林 Locust	0.0062	0.0026	0.0004	0.0019	0.0002	0.0010
富集系数 Enrichment coefficient	油松林 Chinese Pine	0.0288	0.0268	0.0504	0.0133	0.0270	0.0227
	辽东栎林 Oak.	0.0231	0.0131	0.0044	0.0059	0.0007	0.0047
	刺槐林 Locust	0.0403	0.0143	0.0016	0.0067	0.0013	0.0053
循环系数 Cycling coefficient	油松林 Chinese Pine	0.4869	0.4028	0.2839	0.4528	0.3869	0.4216
	辽东栎林 Oak.	0.5737	0.5742	0.4925	0.6235	0.6329	0.5885
	刺槐林 Locust	0.5377	0.7325	0.4486	0.4384	0.5288	0.4862

3 结论

(1) 黄土丘陵区子午岭油松林、辽东栎林和刺槐人工林 3 林分总生物量为 86.247~144.795 t/hm²,乔木层的生物量占总生物量的 98%以上,随群落针阔树种转化替代,群落总生物量呈现明显的增加趋势。年均生长量为 3.275~5.699 t/hm²。生物量和年生长量排序为刺槐人工林>辽东栎林>油松林。在黄土丘陵区刺槐林的生物量较地带性植被的生物量高,这显示出了刺

槐对该区自然环境的适宜性。

(2) 3 林分林下植被层生物量、凋落物贮量表现为刺槐林>辽东栎林>油松林,林下植被层生物量的差异主要是由林分郁闭度和林下凋落物的不同引起的;刺槐林和辽东栎林林下植被层发达的根系和较高的凋落物量不仅有利于提高土壤肥力,而且对水土保持有重要意义。

(3) 3 林分各器官营养元素含量均不相同,总体上同化器官叶的各种元素含量高于其它器官,茎中营养元素的含量最低。乔木层营养元素积累量排序为:刺槐林>辽东栎林>油松林。不同林分不同营养元素的积累量差别较大。因采伐而引起的 3 林分林地养分流失量,辽东栎林和刺槐林分别达 65.45%和 53.76%,而油松林仅有 25.1%。林地营养元素的大量流失,特别是 Ca 和 Mg 的流失,会引起刺槐林和辽东栎林林地土壤理化性质的改变,使林地生产力下降。

(4) 3 林分林下植被层和凋落物层的营养元素积累量排序为:刺槐林>辽东栎林>油松林。凋落物营养元素贮量高于南方常绿阔叶林和亚热带雨林,但远低于华北针叶林。不同群落林下植被层和凋落物层之间营养元素的差异是由于生物种类和生物量的不同引起的。

(5) 3 林分林地 0~60cm 土层营养元素现存量 and 生态系统(包括 0~60cm 土层)营养元素总贮量排序为刺槐林>辽东栎林>油松林;系统各层次营养元素积累量排序为:土壤层>>乔木层>凋落物层>林下植被层。土层中营养元素贮量占该系统总量的 96.10%~99.38%,植被层和凋落物层的贮量仅占 0.49%~2.3%和 0.13%~1.51%。

(6) 3 林分营养元素年吸收量和年归还量排序为刺槐林>辽东栎林>油松林;年存留量排序为辽东栎林>刺槐林>油松林;吸收系数排序为刺槐林>辽东栎林>油松林。油松林的利用系数是辽东栎林和刺槐林的 5.7 倍。富集系数排序为油松林>刺槐林>辽东栎林;其中油松林的富集能力分别是刺槐林和辽东栎林的 4.28 和 4.8 倍。油松林较高的利用系数和富集系数决定了它具有较强的耐瘠能力。循环系数排序为辽东栎林>刺槐林>油松林,可见辽东栎林和刺槐林不仅对林地营养元素要求比油松林高,而且营养元素的循环速率较油松林快。

References:

- [1] Li Y Y, Shao M A. The change of plant diversity during natural recovery process of vegetation in Ziwuling area. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(2):252~260.
- [2] Zhu Z C. Features of vegetation zones in Qinling Mountain and its northern Loess area. *Scientia Geographica Sinica*, 1991, **11**(2):157~163.
- [3] Zou H Y, Liu G B, Wang H S. The vegetation development in North Ziwulin forest region in last fifty years. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2002, **22**(1):1~8.
- [4] Chen C D. The vegetation and its roles in soil and water conservation in the secondary forest area in the boundary of Shaanxi and Gansu Provinces. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1958, (2):152~223.
- [5] Cheng J M, Wan H E. *Vegetation construction and soil and water conservation in the Loess Plateau of China*. Beijing: Chinese Forestry Press, 2002.
- [6] 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.
- [7] Yang W Z, Tian J L. Essential exploration of soil aridization in Loess Plateau. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, **41**(1):1~6.
- [8] Li Y Y, Shao M AN. Climatic change, vegetation Evolution and loe moisture layer of soil on the Loess Plateau. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2001, **15**(1):72~77.
- [9] Binkley D. *Forest Nutrition Managemen*. John Wiley and Sons, New York, 1987. 1~147.
- [10] Bormann F H, et al. *Patterns in a Forested Ecosystem* (Ecological Studies 8), Springer-Verlag New York, 1979. 1~253.
- [11] Charles J Krebs. *Ecology The Experimental Analysis of Distribution and Abundance*. Third Edition. Harper Collins Publishers, 1992. 668~702.
- [12] Cole D W. *Nutrient Cycling in World Forests*. Forest Site and Productivity. Martinus Nijh of Publishers, 1986. 103~115.
- [13] Sang W G, Su H X, Chen L Z. Coupling biomass and energy in warm temperate deciduous broad leaved (*Quercus liaotungensis*) forest ecosystem. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, **26**(supp):88~92.
- [14] Tang J W, Zhang J H, Song Q S, et al. Biomass and net primary productivity of artificial tropical rainforest in Xishuangbanna. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, **14**(1):1~6.
- [15] Li W H, Deng K M, Li F. Study on biomass and primary production of main ecosystems in Changbei mountain. *Research Forestry Ecosystem*, 1981, (2):34~50.
- [16] Fang J Y Ke J H, Tang Z Y, et al. Implication and estimations of four terrestrial productivity parameters. *Acta Ecologica Sinica*, 2001,

25(4):414~419.

- [17] 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.
- [18] Peng S L. Restoration ecology and recovery of degraded ecosystem. *Journal of Chinese Academy Sciences*, 2000, (3):188~192.
- [19] Zhang X B, Guo X Q, Zhou T L, *et al.* Floristic analysis of seed plants in Ziwuling forest region. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2004, **24**(2):267~274.
- [20] Liu S H, Xue Z D, Yu X X, *et al.* Study on nutrient cycle of robinia pseudoacacia water resources protection forest in Miyun reservoir watershed Beijing. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, **16**(3):12~15.
- [21] Liu Z W, Li Y S. Nutrient cycling and balance analysis of black Robinia pseudoacacia forest ecosystem in Gullied Loess Plateau area. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, **19**(5): 635~640.
- [22] Nie D P. Biological cycling of the nutrient element in forest ecosystems. *Forest Research*, 1991, **4**(4): 435~440.
- [23] 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.
- [24] Huang J H, Chen L Z, Han X G. Changes of nutrient concentration during the decomposition process of *Quercus liaotungensis* twigs. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, **22**(5):398~402.
- [25] Tu M Z, Yao W H, Wen H, *et al.* Characteristics of litter in evergreen broad-leaved forest of the Dinghushan Mountain. *Acta Pedologica Sinica*, 1993, **30**(1):34~42.
- [26] 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.
- [27] Zeng S C, Su Z Y, Gu Y K, *et al.* Litterfalls of major forest stands at Baiyunshan scenic spot of Guangzhou. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, **14**(1):154~156.
- [28] Yang J H, Zhang Y T, Li H Y, *et al.* Study on water-holding ability of litter and physical and chemical characteristics of superficial soil in different forest distributions. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, **17**(2):141~144.
- [29] Wang L X, Wang J, Huang J H. Comparison of major nutrient release patterns of *Quercus liaotungensis* leaf litter decomposition in different climatic zone. *Acta Botanica Sinica*, 2003, **45**(4):399~407.
- [30] Li R X, Xue Q H, Yang S Y, *et al.* Improving effect of seabuckthorn and black Robinia pseudoacacia artificial forests to soil fertility in Loess Plateau and its model. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1998, **4**(1):14~21.
- [31] Sun S C, Chen L Z. Leaf nutrient dynamics and restoration efficiency of *Quercus liaotungensis* in the Dongling MT. Region. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, **25**(1):76~82.
- [32] 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.
- [33] Zhang D Q, Yu Q F, Kong G H. Chemical properties of forest floor litter in Dinghushan monsoon evergreen broad-leaved forest. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, **18**(1): 96~100.
- [34] He C Q, Zhao K Y. The accumulation, allocation and biological of the nutrient elements in *Carex lasiocarpa* wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(12):2075~2080.
- [35] Zheng W J, Shao C, Wang L M, *et al.* Dynamic of nutrient elements in litterfall of subtropical rain forest of hexi in Fujian. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 1995, **3**(3):38~43.
- [36] 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] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 陈昌笃. 陕甘边境子午岭稍林区的植被及其在水土保持上的作用. *植物生态学与地植物学资料丛刊*, 1958, (2):152~223.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [13] 桑卫国, 苏宏新, 陈灵芝. 东灵山暖温带落叶阔叶林生物量和能量密度研究. *植物生态学报*, 2002, **26**(增刊):88~92.

- [14] 唐建维,张建候,宋启示,等. 西双版纳热带人工雨林生物量及净第一性生产力的研究. 应用生态学报,2003,14(1):1~6.
- [15] 李文华,邓坤枚,李飞. 长白山主要生态系统的生物量和生产力研究. 森林生态系统研究. 森林生态系统研究,1981,2:34~50.
- [16] 方精云,柯金虎,唐志尧. 生物生产力的“4P”概念、估算及其相应关系. 植物生态学报,2001,25(4):414~419.
- [17] 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.
- [18] 彭少麟. 恢复生态学与退化生态系统的恢复. 中国科学院院刊,2000,(2):188~192.
- [19] 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.
- [20] 刘世海,薛智德,余新晓,等. 密云水库北京集水区刺槐水源保护林主要营养元素的生物循环. 水土保持学报,2003,16(3):12~15.
- [21] 刘增文,李雅素. 黄土残塬沟壑区刺槐人工林生态系统的养分循环通量与平衡分析. 生态学报,1999,19(5):632~634.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 黄建辉,陈灵芝,韩兴国. 辽东栎枝条分解过程中几种主要营养元素的变化. 植物生态学报,1998,22(5):398~402.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 曾曙才,苏志尧,古炎坤,等. 广州白云山风景名胜区主要林分类型凋落物的研究. 应用生态学报,2003,14(1):154~156.
- [28] 杨吉华,张永涛,李红云,等. 凋落物的持水能力和物理化学特征. 水土保持学报,2003,17(2):141~144.
- [29] 王立新,王瑾,黄建辉. 辽东栎叶片凋落物在不同气候带下的分解及其主要元素释放的比较. 植物学报,2003,45(4):399~407.
- [30] 李瑞雪,薛泉宏,杨淑英. 黄土高原沙棘、刺槐人工林对土壤的培肥效应及其模型. 土壤侵蚀与水土保持学报,1998,4(1):14~21.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 张德强,余清发,孔国辉,等. 鼎湖山季风常绿阔叶林凋落物层化学性质的研究. 生态学报,1998,18(1):96~100.
- [34] 何池全,赵魁义. 毛果苔草湿地营养元素的积累、分配及其生物循环特征. 生态学报,2001,21(12):2075~2080.
- [35] 郑文教,邵成,王良睦,等. 福建和溪亚热带雨林凋落物营养元素动态. 热带亚热带植物学报,1995,3(3):38~43.
- [36] 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.