

陕西油松人工林下枯落物层生物量及其碳储量

李庆华¹, 曹 扬^{2,3}, 陈云明^{2,3}, 张硕新¹

(1. 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 水土保持研究所

黄土高原干旱重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:以我国北方主要造林树种油松(*Pinus tabulaeformis*)为研究对象,通过对陕西省北部(陕北)、中部(关中)、南部(陕南)不同生物气候区内不同龄阶油松人工林下枯落物量及其碳储量进行调查分析。结果表明:幼龄林阶段后,不同生物气候区人工油松林林下枯落物含碳率在不同林分发育时期无明显规律;不同区域人工油松林下枯落物含碳率表现为陕南地区幼龄林含碳量明显高于陕北地区,其它林龄阶段含碳率也未表现出明显规律。陕北、关中和陕南地区油松林枯落物生物量和碳储量,均随林龄的增大逐渐增大;不同纬度下,中龄林和近熟林下枯落物生物量和碳储量呈陕北>陕南>关中的趋势,并未表现出随纬度降低而减小的趋势。

关键词:油松人工林; 枯落物生物量; 碳储量变化

中图分类号:S718.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2013)04-0024-05

Litter Mass and Carbon Storage in the *Pinus tabulaeformis* Plantations in Shaanxi Province

LI Qing-hua¹, CAO Yang^{2,3}, CHEN Yun-ming^{2,3}, ZHANG Shuo-xin¹

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract:Based on *Pinus tabulaeformis*, the main afforestation tree of north China, the litter amount and carbon storage of *Pinus tabulaeformis* forests in different biological climate regions of northern Shaanxi, Guanzhong and southern Shaanxi were to surveyed and analyzed. The result showed that after young forest stage, at different developmental stages, the litter carbon rate of pine forest in different biological climate regions presented no obvious rule totally. The performance of litter carbon rate of pine forest in different areas was that the litter carbon content of young forest stage in southern Shaanxi is higher than the northern Shaanxi. The litter carbon rate in other forest age stage also showed no obvious rule. The litter material biomass and carbon stocks in three areas were increasing with increase of stand ages gradually. In different latitudes, the litter material biomass and carbon stocks between middle-aged forest and near mature forest appeared in the order of northern Shaanxi>southern Shaanxi>Guanzhong, and it didn't show decrease trend with decrease of latitude.

Key words:*Pinus tabulaeformis*; litter mass; carbon storage; variation

森林枯落物是森林生态系统的重要组成部分,在维持土壤肥力,促进物质循环和平衡养分方面起着重要作用,同时对水土保持、水源涵养和固碳也发挥着重要的生态功能^[1-2]。在陆地生态系统中,90%以上

的森林地上部分净生产量通过枯落物的方式返回地表^[3-4]。森林地上枯落物现存量的消长情况影响森林生态系统的碳循环和养分循环^[5-6],并表征森林生态系统间的差别和动态特征^[1,3,7-8],是评价生态系统功

收稿日期:2012-11-27

修回日期:2013-01-08

资助项目:关中森林生态系统固碳现状、速率、机制和潜力研究(XDA05050203-05-03)

作者简介:李庆华(1980—),男,西藏人,在读硕士研究生,主要研究方向为森林生态学。E-mail:liqinghua222000@163.com

通信作者:张硕新(1959—),男,陕西户县人,教授,博导,主要研究方向为森林生态、植物生理生态和景观生态。E-mail:sxzhang@nwsuaf.edu.cn

能和科学经营森林的基础。

国内外学者对不同区域的多种森林类型下的枯落物特性等方面做了较多的研究,这些研究主要集中在枯落物的持水特性、储量、拦截地表径流、季节变化、分解速度等方面。如何斌^[9]、郭瑞红^[10]等对不同生长发育阶段人工林的枯落物储量变化特征进行了分析,认为林分枯落物现存量随林龄的增大而增加;叶海英^[11]、徐学华^[12]、张大鹏^[13]等对枯落物储量进行了研究,认为枯落物量与林分类型、经营模式、林分密度、林分起源等都有重要关系;而 Debusk^[14]、Villar^[15]、Xie^[16]、侯翠翠^[17]、史绮^[18]、张林海^[19]、武海涛等^[20]主要研究了枯落物的分解及其影响因子,认为枯落物分解受枯落物自身质量、温度、水分、周围环境营养状况等的共同影响,但受自身质量影响更大。

此外,郑路^[21]进一步归纳总结了我国森林地表枯落物的变化规律,认为从热带到亚热带和温带,随着纬度的增高,枯落物现存量增加;海拔、林型、林龄、群落演替及采伐强度等均影响凋落物现存量。上述研究结果有助于了解和掌握枯落物层的积累与分解

过程、养分循环及其在森林生态系统中的作用。但是关于在气候梯度下,不同林龄枯落物碳储量的变化研究较少,难以分析枯落物碳的归还对森林生态系统碳预算的影响。

鉴于此,本研究以我国北方主要造林树种油松(*Pinus tabulae formis*)为研究对象,调查陕西省北部(陕北)、中部(关中)、南部(陕南)不同生物气候区域、不同龄阶油松人工林下的枯落物量及其碳储量,旨在:(1) 探讨不同生物气候区森林枯落物含碳率特征;(2) 探讨随林分发育森林枯落物现存量与碳储量的变化规律;(3) 检验森林枯落物现存量是否伴随纬度的增加而增加。

1 研究地概况和研究方法

1.1 研究地概况

陕西省地处 105°29′—110°15′E,31°42′—39°35′N,属内陆省份,境内南北狭长,按照气候区域的不同可分为陕北、关中和陕南 3 个部分,3 个地域在气候、土壤、地形地貌等方面均存在很大差异(表 1)。

表 1 不同气候区自然状况

地区	陕北	关中(秦岭北坡)	陕南
气候类型	暖温带半干旱气候	暖温带半湿润气候	北亚热带湿润气候
地貌类型	丘陵	山地	山地
土壤类型	栗钙土、棕壤	棕壤	黄棕壤
年降雨量/mm	400~600	500~700	700~900
年平均温度/℃	7~11	11~13	14~15
平均海拔/m	800~1300	520	1500~2000

1.2 研究方法

1.2.1 野外调查 于 2011 年 8 月在陕北、关中、陕南 3 个气候区域,分别选择立地条件相近的幼龄林(<20 a)、中龄林(21~30 a)、近熟林(31~40 a)和成熟林(41~60 a)样点(表 2)。每个样点分别选取 3 个 50 m×20 m 的标准样地,记录样地的 GPS 定位坐

标、坡向、坡度、坡位、海拔、郁闭度、方位及其在林分中的相对位置,测量样方内乔木的胸径与树高。在样地内按对角线等距选取 3 个 1 m×1 m 的样方,收集样方内的枯落物,并称重。均匀收获约 300 g 枯落物样品,测定其含水量和有机质含量。

表 2 不同气候区域人工油松林林分状况

地区	林龄/ a	纬度	经度	坡向	坡度/ (°)	海拔/ m	郁闭度	平均树 高/m	平均胸 径/cm	平均林分密度/ (株·hm ⁻²)	枯落物厚 度/cm
陕北	9	35°27′32.04″	108°52′46.86″	ES	11	1105	0.3	2.23	2.20	1747	0.4
	22	35°35′50.64″	109°43′27.36″	ES	15	1098	0.6	8.43	6.99	3210	3.9
	35	35°57′46.20″	109°24′51.18″	WS	26	1451	0.6	11.50	9.41	2270	4.8
	50	35°58′28.20″	110°05′22.44″	WN	16	1203	0.6	15.81	14.04	1503	5.7
关中	22	34°04′38.46″	109°28′02.04″	ES	27	983	0.6	11.65	8.79	1863	1.5
	35	34°10′14.42″	106°47′02.48″	WN	18	1003	0.6	12.86	12.96	1717	3.0
	50	33°48′42.12″	107°30′56.90″	ES	19	1016	0.6	14.42	11.08	893	4.3
陕南	9	34°05′27.24″	110°24′10.38″	ES	15	1104	0.6	2.82	2.21	3273	0.3
	22	34°05′08.64″	110°24′15.00″	WS	14	1010	0.4	9.51	8.25	2227	1.9
	35	33°23′20.82″	109°13′56.52″	WN	16	1130	0.7	12.65	10.15	2190	3.2

1.2.2 室内分析 将枯落物样品置入烘箱内(DHG-9000)105℃烘干 2 h 杀青,85℃烘干至恒重,称干重。取 10~20 g 于瓷研钵中充分研磨,过 100 目筛,混合均匀备用。测定样品有机质含量之前,65℃下烘 2 h,取 15~25 mg,采用重铬酸钾—硫酸氧化法测定有机质含量。

1.2.3 数据处理 本研究采用 Excel 2012 处理数据,SPSS 17.0 进行差异性和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 枯落物含碳率的时空变化特征

2.1.1 人工油松林林下枯落物含碳率随林龄的变化特征 陕北地区人工油松林林下枯落物含碳率在幼龄林阶段最低($P<0.05$);中龄林和近熟林林下枯落物含碳率差异不显著($P>0.05$),但都显著大于成熟林($P<0.05$)。在关中地区,近熟林下枯落物含碳率显著小于中龄林下枯落物含碳率($P<0.05$),中龄林与成熟林、近熟林与成熟林下枯落物含碳率差异均不显著($P<0.05$)。在陕南地区,幼龄林、近熟林和成熟林油松人工林下枯落物含碳率差异则均不显著($P>0.05$)(表 3)。

表 3 人工油松林枯落物含碳率随林龄的变化特征 %				
	幼龄林	中龄林	近熟林	成熟林
陕北	25.72±2.76c	46.17±2.54a	46.04±1.08a	37.28±2.77b
关中	—	46.17±0.07a	38.40±2.14b	41.83±3.15ab
陕南	42.47±0.87a	40.75±1.77a	41.17±1.50a	—

注:同一行是相同地区不同林分发育阶段,林下枯落物含碳率多重比较结果,差异值均在 $P=0.05$ 水平上达到显著;“—”表示无。

2.1.2 不同生物气候区人工油松林林下枯落物含碳率特征 如图 1 所示,幼龄林阶段后,不同生物气候区人工油松林林下枯落物含碳率在不同林分发育时期总体无显著性差异,分别为:43.16%±2.13%,42.14%±1.78%,40.94%±1.64%。幼龄林时期,陕北人工油松林林下枯落物含碳率则显著低于陕南。

油松人工林幼龄阶段,陕南地区的林下枯落物含碳率显著大于陕北。中龄阶段,陕南明显低于陕北

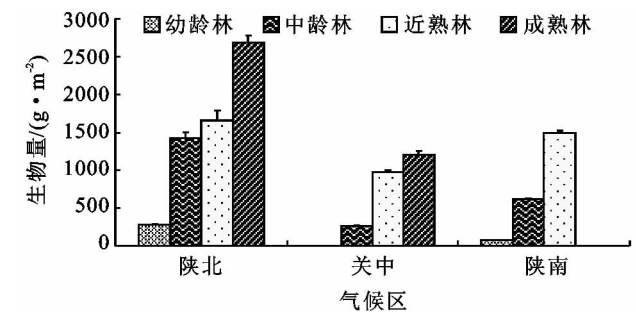


图 2 陕北、关中、陕南不同龄阶油松人工林下枯落物层生物量和碳储量

($P<0.05$),陕北和关中之间差异不显著(图 1)。近熟阶段,陕北地区明显大于关中的和陕南($P<0.05$),关中和陕南之间差异不显著($P>0.05$)。成熟林阶段则表现为陕北与关中无显著性差异($P>0.05$)(图 1)。

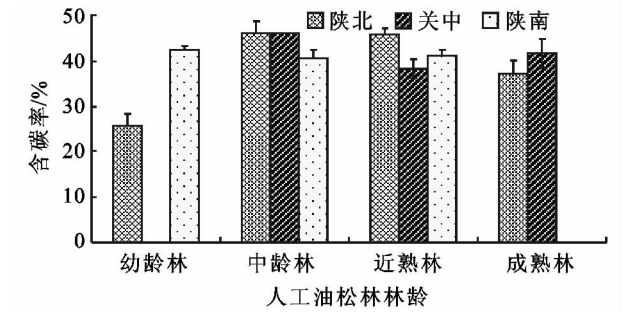


图 1 不同区域各林龄段油松林下枯落物含碳率

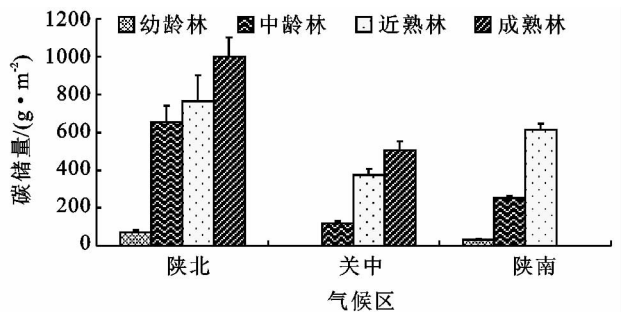
2.2 油松人工林下枯落物层生物量及其碳储量的时空变化特征

2.2.1 陕北地区枯落物层生物量与碳储量变化特征

在陕北地区,幼龄、中龄、近熟和成熟油松人工林下枯落物生物量分别为 276.8,1 424.1,1 658.4,2 680.7 g/m²,呈现出枯落物生物量随林龄的增大而增大的趋势。其中,中龄林和近熟林相比差异不显著($P>0.05$),但均显著大于幼龄林(均为 $P<0.05$),而成熟林下枯落物生物量则最大($P<0.05$)(图 2)。各龄阶油松人工林下枯落物层碳储量分别为 71.5,654.6,764.3 g/m² 和 1 000.7 g/m²,其变化趋势及各龄阶之间的差异与生物量的变化趋势一致。

2.2.2 关中地区枯落物层生物量与碳储量变化特征

关中地区中龄、近熟和成熟油松人工林下枯落物生物量分别为 256.2,968.4,1 205.45 g/m²,表现出林龄增大的特征,枯落物生物量也随之增大的特征。成熟林枯落物生物量显著大于中龄林和近熟林(均为 $P<0.05$),近熟林下枯落物显著大于中龄林($P<0.05$)。中龄、近熟和成熟林下枯落物碳储量分别为 118.3,372.2,504.8 g/m²,随人工林林分发育,林下枯落物碳储量表现出逐渐增大的趋势($P<0.05$)(图 2)。



2.2.3 陕南地区凋落物生物量与碳储量变化特征

陕南地区幼龄、中龄和近熟油松人工林下枯落物生物量分别为 76.0, 613.1, 1 494.2 g/m², 油松人工林下枯落物碳储量分别为 32.2, 249.9, 614.5 g/m², 二者都表现出随林龄增加而增大的趋势(图 2), 且各林龄段油松人工林下枯落物生物量和碳储量均表现为显著差异($P < 0.05$)。

2.3 不同纬度下油松人工林下生物量与碳储量

幼龄人工油松林林下枯落物生物量和碳储量均表现为陕北显著大于陕南($P < 0.05$); 中龄林人工油

松林林下枯落物层生物量在陕北地区最大, 且明显高于陕南地区和关中地区(均为 $P < 0.05$), 陕南地区大于关中地区($P < 0.05$), 而且, 中龄人工油松林在不同气候区下的枯落物碳储量亦表现出相同的趋势; 陕北和陕南地区的人工油松近熟林林下枯落物生物量显著大于关中地区($P < 0.05$), 陕北地区和陕南地区差异不显著($P > 0.05$), 同样, 近熟油松人工林下枯落物碳储量也呈相同趋势。人工油松成熟林林下枯落物层的生物量和碳储量, 均表现为陕北地区显著大于关中地区($P < 0.05$)(图 3)。

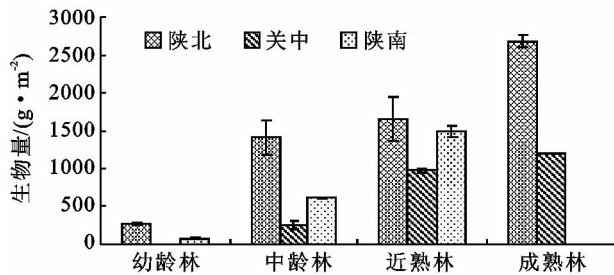


图3 相同龄阶陕北、关中、陕南地区的油松林下生物量和碳储量

3 讨论

3.1 不同生物气候区枯落物含碳率在林分生长过程中的变化

枯落物含碳率主要受其自身成分、质量、分解速度等因素的影响^[22]。陕北地区油松人工幼龄林下枯落物含碳率明显较低, 这可能是由于陕北地区的油松人工幼龄林处于速生阶段, 且密度较小, 枯落物主要是由草本植物组成的, 而草本含碳率相对较低, 导致其含碳率较低^[23]。而同一林龄陕南地区由于林分密度较大, 竞争激烈, 枯落物除草本之外, 也有乔木枝叶, 因此, 含碳率高于陕北地区^[24]。张加武等^[25]对马尾松树种不同的林分密度的研究也表明, 枯落物量与林分密度成正比。而其他林龄油松人工林下枯落物含碳率未表现出明显规律, 这可能与随着林龄增加, 竞争激烈, 林下枯落物组成大多为乔木枝叶有关。

3.2 陕西人工油松林枯落物生物量与碳储量随纬度的变化趋势

在环境背景相似的地段, 林龄对森林枯落物现存量有重要影响, 处于速生阶段的幼龄林, 森林枯落物较少, 随着林龄的增加, 林木间竞争逐渐加剧, 天然整枝强烈, 林分凋落物逐渐增加; 但由于立地条件等因素的影响, 陕西油松林下枯落物生物量和碳储量在不同地区随林龄变化的幅度有差异^[26-27]。

本研究表明, 随林龄增加枯落物生物量和碳储量逐渐增大, 这与何斌^[9]、郭瑞红^[10]、田大伦^[28]、逯军峰^[29]等的研究结论一致, 但苏勇^[30]、王洪岩等^[31]的

研究表明, 树种生长初期, 生长旺盛期树高增加较快, 同时土壤中微生物及各种营养等, 如 C/N 比导致枯落物分解较慢^[32], 而随着林下环境逐渐稳定, 凋落物分解的微生物区系也趋于稳定, 导致凋落物的输入量和凋落物的分解量趋于平衡, 因而总体表现出地表凋落物量随林龄呈先上升后下降的趋势。产生这种差异的原因可能是由树种以及不同研究区的光、温度、水等外界环境因素的不同引起的^[33]。

3.3 人工油松林凋落物生物量与碳储量随林龄的变化趋势

随着气候区域的不同, 人工油松林下枯落物生物量和碳储量相应地发生变化, 一方面主要是由于不同的气候带中植物生长所需的光照、温度、生长等气候因子不同, 造成林木间的竞争激烈程度也不同, 因此, 造成了枯落物生物量和碳储量发生了变化; 另一方面, 温带地区气候较为寒凉, 热量不足, 相应的物质周转较慢, 枯落物不易分解, 枯死地被物积累量最大。热带地区植物的水、热条件适宜且充分, 林分的生产力高, 物质周转较快, 枯落物分解快, 枯落物生物量和碳储量就相对较少^[34]。本研究中油松人工林下枯落物生物量和碳储量随纬度的变化总体表现为: 陕北 > 陕南 > 关中, 未表现出随纬度的降低而减小的趋势, 这与已有的研究结果不同^[21, 33], 可能是由于关中实验地位于秦岭北坡, 温度、年降雨量均低于陕南地区, 但是林下植被生长的环境如土壤肥力、性质等状况优于陕南地区, 林木竞争不及陕南激烈, 所以表现出林下枯落物生物量和碳储量要低于陕南地区的特征。

4 结论

(1) 在陕西各地区,人工油松林下枯落物层含碳率随着林龄、纬度均有变化,在陕北地区,幼龄林、中龄林、近熟林和成熟林的枯落物层含碳率分别为25.72%,46.17%,46.04%,37.28%;关中地区,中龄林、近熟林和成熟林的枯落物含碳率为46.16%,38.40%和41.83%;陕南地区,中龄林、近熟林和成熟林的枯落物含碳率为分别为42.47%,40.75%和41.14%。

(2) 不同生物气候区,随着林分发育人工油松林林下枯落物生物量与碳储量均表现为逐渐增加。不同发育阶段,人工油松林林下枯落物层生物量与碳储量,陕北幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林分别为:276.8 g/m²与71.5 g/m²,1 424.1 g/m²与654.6 g/m²,1 568.4 g/m²和764.3 g/m²,2 680.7 g/m²和1 000.7 g/m²;关中南龄林、近熟林、成熟林分别为256.2 g/m²和118.3 g/m²,968.4 g/m²和372.3 g/m²,1 205.5 g/m²和504.8 g/m²;陕南幼龄林,中龄林,近熟林分别为76.0 g/m²和32.2 g/m²,613.1 g/m²和249.9 g/m²,1 494.2 g/m²和614.5 g/m²,呈现随林龄增大逐渐增大的趋势。

(3) 随着纬度增加,整体并未呈现出规律性变化。中龄林和近熟林枯落物层生物量和碳储量均表现为关中<陕南<陕北。

参考文献:

- [1] Scott N A, Binkley D. Foliage litter quality and annual net N mineralization: comparison across North American forest sites[J]. *Oecologia*, 1997, 111(2): 151-159.
- [2] 王龙, 宋维峰, 杨寿荣, 等. 广西龙脊梯田区森林枯落物水文效应研究[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(6): 84-88.
- [3] 廖军, 王新根. 森林凋落量研究概述[J]. *江西林业科技*, 2000(1): 31-34.
- [4] Loranger G, Ponge J F, Imbert D, et al. Leaf decomposition in two semi evergreen tropical forests: influence of litter quality[J]. *Biology and Fertility Soils*, 2002, 35(4): 247-252.
- [5] 吴承祯, 洪伟, 姜志林, 等. 我国森林凋落物研究进展[J]. *江西农业大学学报*, 2000, 22(3): 405-410.
- [6] 黄萍, 黄春长. 全球增温与碳循环[J]. *陕西师范大学学报: 自然科学版*, 2000, 28(2): 104-109.
- [7] 杨曾奖, 曾杰, 徐大平, 等. 森林枯枝落叶分解及其影响因素[J]. *生态环境*, 2007, 16(2): 649-654.
- [8] 李军, 田超, 杨新兵, 等. 河北省木兰林管局典型森林类型枯落物水文效应研究[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(4): 192-196.
- [9] 何斌, 黄承标, 韦家国, 等. 不同林龄秃杉人工林凋落物储量及其持水特性[J]. *东北林业大学学报*, 2009, 37(3): 44-46.
- [10] 郭瑞红, 叶功富, 卢昌义, 等. 不同生长发育阶段木麻黄人工林的凋落物动态[J]. *海峡科学*, 2008(10): 11-13, 18.
- [11] 叶海英, 赵廷宁, 赵陕峰, 等. 半干旱黄土丘陵沟壑区几种不同人工水土保持林枯落物储量及持水特性研究[J]. *水土保持研究*, 2009, 16(1): 121-125, 130.
- [12] 徐学华, 崔立志, 王锡武, 等. 不同经营措施对冀北山地华北落叶松林枯落物持水性能的影响[J]. *水土保持研究*, 2010, 17(3): 157-161.
- [13] 张大鹏, 范少辉, 蔡春菊, 等. 川南退耕丛生竹林枯落物持水特性研究[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(5): 181-184, 189.
- [14] Debussk W F, Reddy K R. Litter decomposition and nutrient dynamics in a phosphorus enriched everglades marsh[J]. *Biogeochemistry*, 2005, 75: 217-240.
- [15] Villar C A, de Cabo L, Vaithianathan P. Litter decomposition of emergent macrophytes in a floodplain marsh of the lower Parana River[J]. *Aquatic Botany*, 2001, 70(2): 105-116.
- [16] Xie Yonghong, Yu Dan, Ren Bo. Effects of nitrogen and phosphorus availability on the decomposition of aquatic plants[J]. *Aquatic Botany*, 2004, 80(1): 29-37.
- [17] 侯翠翠, 宋长春, 李英臣, 等. 不同水分条件下毛茛苔草枯落物分解及营养动态[J]. *生态学报*, 2012, 32(2): 650-658.
- [18] 史绮, 焦锋, 陈莹, 等. 杭州西湖北里湖荷叶枯落物分解及其对水环境的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(18): 5171-5179.
- [19] 张林海, 曾从盛, 张文娟, 等. 闽江河口湿地枯落物分解及主要影响因子[J]. *应用生态学报*, 2012, (9): 2404-2410.
- [20] 武海涛, 吕宪国, 杨青, 等. 三江平原典型湿地枯落物早期分解过程及影响因素[J]. *生态学报*, 2007, 27(10): 4027-4035.
- [21] 郑路, 卢立华. 我国森林地表凋落物现存量及养分特征[J]. *西北林学院学报*, 2012, 27(1): 63-69.
- [22] 齐泽民, 王开运, 宋光煜, 等. 川西亚高山箭竹群落枯枝落叶层生物化学特性[J]. *生态学报*, 2004, 24(6): 1230-1236.
- [23] 程堂仁, 冯菁, 马钦彦, 等. 甘肃小陇山森林植被碳库及其分配特征[J]. *生态学报*, 2008, 28(1): 33-44.
- [24] 封磊, 洪伟, 吴承祯, 等. 天然黄山松竞争指标及林分竞争生长模型的研究[J]. *江西农业大学学报: 自然科学版*, 2002, 24(2): 251-254.
- [25] 张家武, 廖利平, 李锦芳, 等. 马尾松火力楠混交林凋落动态及其对土壤养分的影响[J]. *应用生态学报*, 1994, 18(4): 306-313.

- [7] Costanza R. Toward an operational definition of ecosystem health[M]// Costanza R, Norton B G, Haskell B D. Ecosystem Health: New Goals for Environmental Management. Washington D C: Island Press, 1992.
- [8] FAO. A Framework for Land Evaluation [M]. Rome: FAO, 1976.
- [9] Burrough A. Fuzzy mathematical methods for soil survey and land evaluation[J]. Journal of Soil Science, 1989, 40(3): 477-492.
- [10] McBratney A B, Odeh I O A. Application of fuzzy sets in soil science: fuzzy logic, fuzzy measurements and fuzzy decisions[J]. Geoderma, 1997, 77(2/3/4): 85-113.
- [11] Wang Fangju, Hall G B, Subaryono. Fuzzy information representation and processing in conventional GIS software: database design and application [J]. International Journal of Geographical Information Science, 1990, 4(3): 261-283.
- [12] 王庄日, 谭永忠, 薛继斌, 等. 基于优度评价法的西藏土地利用生态安全评价研究[J]. 中国土科学, 2010, 24(3): 49-52.
- [13] 王寅, 李小坤, 李雅颖. 红壤不同地力条件下直播油菜对施肥的响应[J]. 土壤学报, 2012, 49(1): 121-127.
- [14] 王晓娟, 贾志宽, 梁连友. 旱地施有机肥对土壤水分和玉米经济效益影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 144-148.
- [15] 邱喜阳, 王晨阳, 王彦丽, 等. 施氮量对冬小麦根系生长分布及产量的影响[J]. 西北农业学报, 2012, 21(1): 53-58.
- [16] 张世文, 黄元仿, 苑小勇. 县域尺度表层土壤质地空间变异与因素分析[J]. 中国农业科学, 2011, 44(6): 1154-1164.
- [17] 闫鸿媛, 段英华, 徐明岗, 等. 长期施肥下中国典型农田小麦氮肥利用率的时空演变[J]. 中国农业科学, 2011, 44(7): 1399-1407.
- [18] 蔡泽江, 孙楠, 王伯仁, 等. 长期施肥对红壤 pH、作物产量及氮、磷、钾养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料科学, 2011, 17(1): 71-78.
- [19] 杨晓, 郝明德, 李芳林. 黄土区长期施肥对小麦产量和养分吸收的影响[J]. 土壤通报, 2010, 41(1): 164-168.
- [20] 刘淑云, 谷卫刚, 唐研, 等. 鲁西北地区土壤主要养分因子与济麦 22 产量和品质的关系研究[J]. 土壤通报, 2011, 42(2): 365-368.
- [21] 孙波, 张桃林, 赵其国. 我国东南丘陵山区土壤肥力的综合评价[J]. 土壤学报, 1995, 32(4): 362-369.
- [22] 张月平, 张炳宁, 王长松, 等. 基于耕地生产潜力评价确定作物目标产量[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 328-332.
- [23] 张甘霖, 吴运金, 赵玉国. 基于 SOTER 的中国耕地后备资源自然质量适宜性评价[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 1-7.

(上接第 28 页)

- [26] 宋日钦, 翟明普, 贾黎明, 等. 三倍体毛白杨地上凋落物对林龄的响应[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(3): 17-19, 22.
- [27] 官丽莉, 周国逸, 张德强, 等. 鼎湖山亚热带常绿阔叶林凋落物量 20 年动态研究[J]. 植物生态学报, 2004, 28(4): 449-456.
- [28] 田大伦, 宁晓波. 不同龄组马尾松林凋落物量及养分归还量研究[J]. 中南林学院学报, 1995, 15(2): 163-169.
- [29] 逯军峰, 王辉, 曹靖, 等. 不同林龄油松人工林枯枝落叶层持水性及养分含量[J]. 浙江林学院学报, 2007, 24(3): 319-325.
- [30] 苏勇. 福建柏造林实验研究[J]. 广西林业科学, 1991, 20(4): 187-191.
- [31] 王洪岩, 王文杰, 邱岭, 等. 兴安落叶松林生物量、地表枯落物量及土壤有机碳储量随林分生长的变化差异[J]. 生态学报, 2012, 32(3): 833-843.
- [32] Schlesinger W H, Hasey M M. Decomposition of chaparral shrub foliage: losses of organic and inorganic constituents from deciduous and evergreenleaves[J]. Ecology, 1981, 62(3): 762-774.
- [33] 林波, 刘庆, 吴彦, 等. 森林凋落物研究进展[J]. 生态学报, 2004, 23(1): 60-64.
- [34] 凌华, 陈光水, 陈志勤, 等. 中国森林凋落量的影响因素[J]. 亚热带资源与环境学报, 2009, 4(4): 66-71.