

森林土壤/植被碳储量及其空间分布特征综述

唐晓红, 谢 斌, 黄飞鸿, 缪 芸, 吴佳声, 蒋智杰 (四川农业大学建筑与城乡规划学院, 四川成都 611830)

摘要 土壤/植被碳储量及其空间分布在全球气候变化中起着重要作用。介绍了碳储量估算方法主要有土壤类型法、生命地带类型法、模型法等, 指出由于研究尺度和数据来源不同, 森林土壤/植被的碳密度和碳储量统计结果尚存在很大的不确定性。进而分析和比较了区域、国家和全球尺度森林土壤/植被碳储量及其空间分布特征, 最后提出采用实时动态监测(RS/GIS)与长期定位实验实测数据相结合方法估算土壤/植被的碳密度/碳储量是提高森林土壤/植被碳储量估算精度的重要措施。

关键词 森林土壤/植被; 碳储量; 空间分布; 估算方法

中图分类号 S718.5 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2016)18-146-04

Review of Forest Soil/Vegetation Carbon Storage and its Spatial Distribution Characteristics

TANG Xiao-hong, XIE Cheng, HUANG Fei-hong et al (College of Architecture and Urban Planning, Sichuan Agricultural University, Chengdu, Sichuan 611830)

Abstract Soil/Vegetation carbon storage and its spatial distribution characteristics play an important role in global climate change. Estimation methods of carbon storage mainly included soil type method, life zone type method, model method and so on. It was pointed out that the statistical results of carbon density and carbon storage in forest soil/vegetation still were great uncertainty due to the different research scales and data sources. Then, we analyzed and compared the regional, national and global scale forest soil/vegetation carbon and its spatial distribution characteristics. Finally, real-time dynamic monitoring (RS/GIS) combining with a long-term experiment measured data was used to estimate the carbon density/storage of soil/vegetation, which was an important measure to improve the estimation precision of forest soil/vegetation carbon storage reserves.

Key words Forest soil/vegetation; Carbon storage; Spatial distribution; Estimation method

人类活动已对碳在地球各圈层特别是大气圈与土壤圈之间的平衡机制产生相当显著的影响, 大气 CO₂ 浓度持续增高已为公认的事实^[1]。土壤有机碳作为全球碳库的一部分, 对全球碳循环、碳储量分布有着巨大的影响^[2-11]。土壤碳库极微小的变化都将导致大气圈以及土壤圈碳储量和碳浓度产生较大变化^[2]。大尺度变化往往是由许多小尺度变化导致的, 作为有机碳重要组成部分的森林土壤/植被有机碳即使发生微小变化也会导致 CO₂ 浓度增长, 从而影响全球气候变化^[3]。因而, 森林土壤/植被有机碳储量及空间分布成为陆地生态系统有机碳循环研究的热点。国内外学者主要就是森林土壤/植被碳密度大小^[12-21]、碳储量累积效应^[17-27]及其估算方法^[6-11, 28-30]、分布特征^[23-27]等方面开展了深入研究并取得了显著成效。笔者拟从区域、国家和全球尺度分析和比较森林土壤/植被碳储量的估算方法、碳密度和碳储量估算结果及其空间分布特征, 以期为全球气候变化研究中了解森林植被/土壤碳循环过程提供基础数据。

1 森林土壤/植被碳储量估算方法

土壤是森林生态系统运行的物质基础, 森林生态系统的水热平衡变化会导致大气中 CO₂ 的变化^[4]。以实测数据来定量研究森林土壤/植被的碳储量和碳平衡对于全面了解全球各个圈层的碳平衡具有一定的参考价值。森林生态系统土壤碳库主要指森林土壤中 1 m 以上表层土壤的有机碳, 其碳含量是植被碳含量的 2~3 倍, 是全球大气碳库 (750 × 10⁹ t) 的 2 倍多^[5]。土壤碳储量估算方法中以土壤类型法、生命地带类型法和模型方法为主 (表 1)。另外, 由于 GIS (Geo-

graphic Information System) 技术具有强大的空间分析能力, 在地理学、土壤学、森林生态学等方面得到了广泛应用, 利用 GIS 中地统计分析功能对土壤碳储量和空间分布状况进行建模, 可以很好地估算出土壤碳储量。

土壤深受气候、植被和生物等因素的影响, 具有一定的空间变异性, 加之不同研究者研究利用的资料数据、侧重点不同, 因而全球土壤圈层碳储量的估算存在极大的差异性和不确定性^[6-8]。

2 区域森林土壤/植被碳密度和碳储量

土壤碳密度指单位面积一定深度的土层中土壤碳储量, 单位一般用 t/hm² 或 kg/m², 由于它以土体体积为基础作计算, 排除了面积和土壤深度的影响, 因此土壤碳密度已成为评价和衡量土壤中碳储量的一个重要指标。森林土壤/植被碳密度的估算同碳储量的估算方法差异不大, 但因其研究方法、研究尺度以及不同地域影响森林土壤/植被的因子不同也会导致最终估算的结果存在极大的差异性。我国主要森林生态系统土壤碳储量为 21.0 × 10⁹ t^[30], 而利用面积加权估算我国森林土壤平均碳密度为 8.14 t/hm², 土壤碳储量为 10.5 × 10⁹ t, 约占中国森林生态系统碳库的 66%^[31]。我国热带、亚热带地区不同植被类型碳储量差异较大: 针叶林 100 cm 厚土层内东部储量为 1.93 × 10⁹ t, 西部为 4.18 × 10⁹ t, 在 20 cm 厚土层内东部储量为 0.72 × 10⁹ t, 西部为 1.72 × 10⁹ t; 阔叶林 100 cm 厚土层东部储量为 1.06 × 10⁹ t, 西部为 3.58 × 10⁹ t, 20 cm 厚土层内东部储量为 0.44 × 10⁹ t, 西部为 1.46 × 10⁹ t; 灌丛和萌生矮林 100 cm 厚土层内东部储量为 4.62 × 10⁹ t, 西部为 7.94 × 10⁹ t, 20 cm 厚土层内东部储量为 1.74 × 10⁹ t, 西部为 2.87 × 10⁹ t; 草原和稀树灌木草原 100 cm 厚土层内东部储量为 0.05 × 10⁹ t, 西部为 0.37 × 10⁹ t, 20 cm 厚土层内东部储量为 0.02 × 10⁹ t, 西部为 0.16 × 10⁹ t^[21]。

基金项目 四川省教育厅项目(09ZB049)。

作者简介 唐晓红(1974-), 女, 四川安岳人, 副教授, 博士, 硕士生导师, 从事水土保持与养分循环研究。

收稿日期 2016-05-06

表 1 土壤碳储量估算方法

Table 1 Estimation method of soil carbon storage

估算方法 Estimation method	优点 Advantage	局限性 Limitation	代表学者 Reprehensive scholar
土壤类型法 Soil type method	该方法思路简单,土壤剖面数据获取比较容易,形成统一的估算体系,便于汇总和对比	不适用于土壤分类缺失或土地变更频率高的区域,在特定尺度上进行聚类时需要更多的土壤剖面数据	Batjes ^[9]
生命地带类型法 Life zone type method	该方法展现了不同生命地带类型的土壤碳储量,且各生命带类型还可能包括不同的土壤类型,分布范围更加广泛,从各个角度反映气候因素及植被类型对土壤碳储量的影响	该方法不确定因素较多,主要影响因素包括全球植被类型、土壤类型在统计时不准确,易产生估算误差	Post 等 ^[8]
模型法 Model method	模型法可以有效地解决静态模型估算中不确定性因素对估算精度的影响,充分应用现有剖面数据,并将其推算到相似的土壤和生态区域,较好地解决了估算中尺度转换的问题	缺乏大量相关和连续观测数据,使模型的参数化和初始化更加困难	Parton 等 ^[10-11]
相关关系估算方法 Correlation estimation method	这种估算方法得到的结果相关性较高,且数据是通过实测得出,可靠性较强,操作简单	受海拔、纬度、温差、植被类型的影响,碳含量估算结果存在一定的差异性和不确定性,所确定的统计关系需要得到检验和验证,才能在该区域上应用	Huntington 等 ^[28]
GIS 估算方法 GIS estimation method	该方法能直观显示不同尺度土壤碳库属性及空间分布	该方法受计算机系统、数据相关和连续性、地图精度以及模型参数等因素的影响	蔡会德等 ^[29]

小尺度区域的研究是区域研究的重要内容。四川森林是西南林区的主体,地处“世界第三极”——青藏高原东缘,是全球气候变化的敏感响应区^[13]。黄从德等^[12]利用森林土壤实测数据与 GIS 相结合估算四川森林土壤碳储量为 $(2\ 394.26 \pm 514.15) \times 10^6$ t, 平均碳密度为 190.45 t/hm²。不同森林类型土壤碳密度差异较大,介于 $(102.69 \pm 21.09) \sim (264.41 \pm 49.24)$ t/hm², 其有机碳含量、碳密度和碳储量都随土层深度的增加而降低。四川省气候湿润,人口密度大,在低海拔区域,大型植被和森林资源分布较少,加之农业活动范围不断扩大,导致原有植被被破坏,继而引起土壤中微生物群落被破坏,使植被枯落物分解效率明显降低,土壤中的碳相对减少;而在四川高海拔地区,如甘孜州、阿坝州和凉山州,森林资源分布均匀,且气候湿润,光照强度大,昼夜温差大,土壤中微生物的活性较低,使得土壤中的有机物分解缓慢,微生物呼吸作用排放的碳减少,土壤中的碳储量相对较高。四川森林土壤碳密度的空间分布表现出明显的“三向地带性”,即经向地带性、纬向地带性和垂直地带性,总体上均随着纬度和海拔的增加而增加,随着经度的增加而减小^[12]。魏亚伟等^[14]研究了东北林区 5 种主要森林类型(针叶混交林、针阔混交林、阔叶混交林、落叶松林和白桦林)4 个林龄(幼龄林、中龄林、近熟林和过熟林)的土壤碳密度,结果表明东北林区不同森林类型的土壤碳密度均以表层土壤最高,随土壤深度的增加逐渐减少,而随森林类型和林龄的变化并不显著;其中大兴安岭、小兴安岭和长白山森林 0~20 cm 厚土壤分别贮存了其剖面总碳密度的 84.7%~86.1%、51.7%~59.8% 和 51.2%~53.4%;随纬度的增加,森林土壤总碳密度明显下降,可能与东北林区土壤发生层的厚度密切相关。

3 中国森林土壤/植被碳密度及碳储量

我国学者对土壤有机碳的研究主要是利用全国土壤普查得到的大量土壤属性数据来进行。方精云等^[16]根据 1:1 000 万《中华人民共和国土壤图》粗略估算得到 1 m 厚土层的碳密度为 190.5 t/hm²。王绍强等^[17]根据第 1 次土壤普查

得到的土壤各类型分布面积、采样数据、土壤有机质含量,运用 GIS 技术估算出 1 m 厚土层的碳密度为 108.3 t/hm²。潘根兴^[18]根据《中国土种志》(1~6 册)的基本数据统计得到中国土壤 1 m 厚土层的碳密度(剖面计算值)为 54.6 t/hm²。金峰等^[7]根据 1:400 万《中华人民共和国土壤图》估算出 1 m 厚土层的碳密度为 123.9 t/hm²。李克让等^[19]应用植被、土壤和大气碳交换(CEVSA)模型,根据 0.5°经纬网格的气候、土壤和植被数据,得到 1 m 厚土层的碳密度为 91.7 t/hm²。解宪雨等^[20]基于我国 1:400 万土壤图和全国第 2 次土壤普查数据,运用 GIS 技术得到 1 m 厚土层的碳密度为 91.4 t/hm²。于东升等^[21]基于 1:100 万《中华人民共和国土壤图》估算我国 1 m 厚土层的碳密度为 96.0 t/hm²。李启权等^[22]基于 1:100 万的《中华人民共和国土壤图》和第 2 次土壤普查数据得到 1 m 厚土层的碳密度为 17.07 t/hm²。利用 1:400 万土壤图得到的碳密度为 $54.6 \sim 190.5$ t/hm²,由 1:100 万土壤图计算得出的碳密度差异明显。可见采用不同比例尺计算出的 1 m 厚土层范围内碳密度差异很大;同种比例尺下,样本数量不同、计算方法不同得到的碳密度差异也很大;周玉荣等^[30]对我国森林土壤有机碳的研究中得出平均碳密度是 193.6 t/hm²,比较前人研究得出的我国森林生态系统的平均碳密度是 258.8 t/hm²,差异性十分明显。不同研究者所采用的资料、计算方法及其侧重点不同,使得我国土壤碳密度估算结果尚存在很大的不确定性(表 2)。

结合我国 1:400 万土壤图和全国第 2 次土壤普查数据,利用 GIS 技术,对我国土壤碳密度及碳储量做出估算,分析得出土壤碳密度具有高度的空间变异性,土壤碳密度较低的地区是准噶尔盆地、塔里木盆地与河西走廊、柴达木盆地等沙漠化地区,其次是黄土高原;昆仑山地、藏北高原;华北地区和华北地区的土壤碳密度变化幅度较大,但华北地区明显小于华中地区,华南地区的土壤碳密度分布较大而且较均匀;土壤碳密度较高的地区是东北地区和青藏高原区的藏东川西区^[20]。研究表明,我国森林土壤碳密度总体表现为东部高于西部,中国东南和西南部亚热带和热带森林分布地区

的植被碳密度较高,而东北地区和青藏高原东南缘土壤碳密度较高^[19]。土壤有机碳分布和森林土壤有机碳分布具有一

定的一致性,即东北地区和青藏高原区土壤碳密度较高。

表2 我国土壤碳密度估算结果

Table 2 Estimation results of soil carbon density in China

研究时间 Research year	研究者 Researchers	基础数据 Basic data		碳密度取值方法 Valuing method of carbon density	碳密度 Carbon density t/hm ²
		土壤图(年份) Soil map	剖面数 Number of sections		
2000	方精云	1:1 000 万(1978)	725	面积加权平均值	190.5
2000	王绍强	1:400 万(1988)	2 473	—	105.3
2000	金峰	1:400 万(1988)	3 600	—	123.9
1999	潘根兴	—	2 500	剖面计算值	54.6
2004	解宪丽	1:400 万(2000)	2 450	中值或面积加权平均值	91.4
2003	李克让	0.5°经纬网格的气候、土壤和植被数据, 生物地球化学模型(CEVSA)		碳储量/面积	91.7
2005	于东升	1:100 万(1995)		剖面计算值	96.0
2010	李启权	1:100 万(1995)	5 374	平均值对数变换	170.7

4 全球土壤/植被碳储量及其分布

森林在全球碳平衡中起着重要的作用,全球森林土壤碳储量为 $402 \times 10^9 \sim 787 \times 10^9$ t,占全球陆地土壤中碳储量的25%~50%。研究者对土壤有机碳的估算大多是采集少数几个土壤剖面来进行数据分析得出的,美国研究者 Bolin^[23]根据9个土壤剖面的碳含量,推算出全球1 m厚土层范围内的土壤碳总储量为 710×10^9 t。还有利用土壤分布图及相关土层碳含量,估算出全球土壤碳总储量为 $2 949 \times 10^9$ t^[24]。这2个估计值成为当前对全球土壤碳库估计的上下限^[25]。为了获得更加准确的结论,Bohn^[26]利用土壤分布图和187个土壤剖面碳密度值,重新估算全球土壤碳总储量为 $2 200 \times 10^9$ t。前人利用生命带方法研究了全球各主要生命带(Life Zone)的共计2 696个土壤剖面数据,利用土壤容重估计和土壤碳密度估计的2个回归方程,分析出全球1 m厚土层范围内土壤碳总储量为 $1 395 \times 10^9$ t^[27]。

随着“3S”技术的发展,已有学者开始利用该项技术进行土壤有机碳的相关运算分析。利用此技术,Schlesinger等^[32]估算出全球1 m厚土层的土壤碳总储量为 $1 500 \times 10^9$ t,Eswaran等^[2]计算出全球1 m厚土层的土壤碳总储量为 $1 576 \times 10^9$ t。Batjes^[9]根据土壤类型法估算全球1 m以内土层的碳储量,他利用世界土壤图并将其按0.5经度与0.5纬度划分为259 200个基本网格单元,根据每个单元的土种分布、土层厚度、土壤容重、有机碳及砾石含量等数据计算出网格单元的平均碳密度,结果显示全球1 m厚土层的碳储量为 $(1 462 \sim 1 548) \times 10^9$ t。Jobby等^[33]认为在2~3 m厚土层中还储存着约 842×10^9 t的碳。据估算,全球陆地生态系统碳总储量约为 $2 500 \times 10^9$ t,是大气碳库(750×10^9 t)的3倍,其中全球植被碳储量约为 500×10^9 t,1 m厚土层碳储量为 $2 000 \times 10^9$ t^[34-35]。

此外,有学者估算出全球森林土壤碳储量在 $(925 \sim 2 775) \times 10^9$ t,其中热带雨林为 82×10^9 t,温带林为 72×10^9 t,北方林为 135×10^9 t,林地及灌木林为 72×10^9 t^[36-37]。Houghton^[38]估算出热带森林土壤碳储量为 187×10^9 t,温带森林为 117×10^9 t,极地森林为 241×10^9 t,热带疏林及稀树

草原为 88×10^9 t,温带疏林草原为 251×10^9 t。从纬度高低的影响情况来看,高纬度地区的北方森林土壤碳储量最大,在全球森林土壤总碳储量中占60%,在中纬度的温带森林中约占37%,在低纬度热带森林中约占13%,即森林土壤碳储量在森林总碳库中所占的比重随着纬度的降低而降低。森林土壤碳密度也呈现类似的变化规律,以高纬度的北方森林土壤最大,中纬度的温带森林土壤次之,低纬度的热带森林最小^[38-39]。森林土壤/植被的碳储量/碳密度在不同纬度呈现的规律同时还受到该地区的气候条件、植被类型、植被枯落物的分解速率和吸收效率的影响。

5 结语

(1)目前国内在森林土壤/植被的碳储量/碳密度研究中,多数还是利用以往全国森林资源清查和土壤普查的数据资料,进行样品实测的研究较少,今后应针对研究区的情况确定具有代表性的采样点,进行样品采集处理分析,以得到更加可靠的结果。

(2)大尺度的植被类型图或土壤类型图仍然是当下研究的基础数据,但它们并不能代表较小地域尺度的数值。

(3)由于土壤的空间变异性较大,加上土壤分布不均、气候变化大、植被类型多样等因素的影响,对森林土壤/植被有机碳的估算存在较大的差异和不确定性。因此,针对不同林分土壤有机碳储量及其空间分布的研究是十分必要的。

参考文献

- [1] CONWAY T J, TANS P P, WATERMAN L S, et al. Evidence for inter-annual variability of the carbon cycle from the NOAA/CMDL global air sampling network [J]. Journal of geophysical research, 1994, 992 (11): 22831-22855.
- [2] ESWARAN H, VANDER BERG E, REICH P, et al. Organic carbon in soils of the world [J]. Science society of America journal, 1993, 57 (1): 192-194.
- [3] SCHOMEL D S, BRASWELL B H, HOLLAND E A, et al. Climatic, epahic and biotic controls over storage and turnover in carbon in soils [J]. Global biogeochemical cycles, 1994, 8(3): 279-293.
- [4] SINGH S K, SINGH A K, SHARMA B K, et al. Carbon stock and organic carbon dynamics in soils of Rajasthan India [J]. Journal of arid environments, 2007, 68(3): 408-421.
- [5] 李甜甜, 季宏兵, 孙媛媛, 等. 我国土壤有机碳储量及影响因素研究进展 [J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2007, 28(1): 93-97.
- [6] 常瑞英, 刘国华, 傅伯杰, 等. 区域尺度土壤固碳量估算方法评述 [J].

- 地理研究,2010,29(9):1616-1628.
- [7] 金峰,杨浩,赵其国,等. 土壤有机碳储量及影响因素研究进展[J]. 土壤,2000,32(1):11-17.
- [8] POST W M, PENG T H, EMANUEL W R, et al. The global carbon cycle[J]. American scientise,1990,27(78):310-326.
- [9] BATJES N H. Total carbon and nitrogen in soils of the world[J]. European journal of soil science,1996,47(1):151-163.
- [10] PARTON W J, SCHIMMEL D S, COLE C V, et al. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in the Great Plains grasslands[J]. Science society of America journal,1987,51(5):1173-1179.
- [11] PARTON W J, RASMUSSE P E. Long term effects of crop management in wheat/fallow (II) century model simulations[J]. Science society of America journal,1994,58(2):530-536.
- [12] 黄从德,张健,杨万勤,等. 四川森林土壤有机碳储量的空间分布特征[J]. 生态学报,2009,29(3):1217-1225.
- [13] 张新时,张奠安. 中国全球变化样带的设置与研究[J]. 第四纪研究,1995(1):43-52.
- [14] 魏亚伟,于大炮,王清君,等. 东北林区主要森林类型土壤有机碳密度及其影响因素[J]. 应用生态学报,2013,24(12):3333-3340.
- [15] 杨晓梅,程积民. 不同林地土壤有机碳储量及垂直分布特征[J]. 中国农学通报,2010,26(9):132-135.
- [16] 方精云,刘国华,徐嵩龄,等. 中国陆地生态系统的碳库[M]//王庚辰,温玉璞. 温室气体浓度和排放检测及相关过程. 北京:中国环境科学出版社,1996:109-128.
- [17] 王绍强,周成虎. 中国陆地土壤有机碳库的估算[J]. 地理研究,1999,18(4):349-355.
- [18] 潘根兴. 中国土壤有机碳和无机碳库量研究[J]. 科技通报,1999,15(5):330-332.
- [19] 李克让,王绍强,曹明奎,等. 中国植被和土壤碳储量[J]. 中国科学,2003,33(1):72-80.
- [20] 解宪丽,孙波,周慧珍,等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J]. 土壤学报,2004,41(1):35-43.
- [21] 于东升,史学正,孙维侠,等. 基于 1:100 万土壤数据库的中国土壤有机碳密度及储量研究[J]. 应用生态学报,2005,16(12):2279-2283.
- [22] 李启全,岳天祥,范泽孟,等. 中国表层土壤有机质空间分布模拟分析方法研究[J]. 自然资源学报,2010,25(8):151-165.
- [23] BOLIN B. Change of land biota and their importance for the carbon cycle[J]. Science,1977,196(4290):613-615.
- [24] BOHN H L. Estimate of organic carbon in world soils[J]. Soil science society of America journal,1976,40(3):468-470.
- [25] 汪业勤,赵士洞,牛栋,等. 陆地土壤碳循环的研究动态[J]. 生态学杂志,1999,18(5):29-35.
- [26] BOHN H L. Estimate of organic carbon in world soils[J]. Soil science society of America journal,1982,46(5):1118-1119.
- [27] POST W M, EMANUEL W R, ZINKE P J, et al. Soil carbon pools and world life zones[J]. Nature,1982,298(8):156-159.
- [28] HUNTINGTON T G, JOHNSON C E, JOHNSON A H, et al. Carbon, organic matter and bulk density relationships in a forested spodosol[J]. Soil science,1989,148(5):380-386.
- [29] 蔡会德,张伟,江锦峰,等. 广西森林土壤有机碳储量估算及空间格局特征[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2014,38(6):1-5.
- [30] 周玉荣,于振良,赵士洞,等. 我国主要森林生态系统碳储量及碳平衡[J]. 植物生态学报,2000,24(5):518-522.
- [31] 李克让. 土地利用变化和温室气体净排放与陆地生态系统碳循环[M]. 北京:气象出版社,2002:1-3.
- [32] SCHLESINGER W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon storage potential of soil[J]. Nature,1990,348(15):232-234.
- [33] JOBBGY E G, JACKSON R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation[J]. Ecological applications,2000,10(2):423-436.
- [34] HEERDEGEN R. Climate change: The IPCC scientific assessment. Cambridge: Cambridge University Press for the Intergovernmental Panel on Climate Change (World Meteorological Organisation/United Nations Environmental Programme)[J]. Progress in physical geography,1991,15(3):321-323.
- [35] ROBERT H. Land use, land-use change, and forestry[J]. The quarterly review of biology,2002,77(2):224-225.
- [36] WOODWELL G M, WHITTAKER R H, REINERS W A, et al. The biota and world carbon budget[J]. Science,1978,199(4325):141-146.
- [37] AJTAY G L. Terrestrial primary production and phytomass: The global carbon cycle[M]. Chichester: John wileysons,1979:129-182.
- [38] HOUGHTON R A. Land-use change and carbon cycle[J]. Global change biology,1995,1(4):275-287.
- [39] 陈遐林. 华北主要森林类型的碳汇功能研究[D]. 北京:北京林业大学,2003.

(上接第 138 页)

现已应用于大部分植物药化学成分的提取,有关超声提取的机理还有待于进一步研究。

表 2 岩白菜素提取工艺的正交试验结果

Table 2 Results of orthogonal test on the extraction technology of bergenin

序号 Code	A	B	C	岩白菜素含量 Bergenin content mg/g
1	1	1	1	22.28
2	1	2	2	32.63
3	1	3	3	35.58
4	2	1	2	29.96
5	2	2	3	30.23
6	2	3	1	39.32
7	3	1	3	30.11
8	3	2	1	35.20
9	3	3	2	40.01
k_1	30.163	27.450	32.267	
k_2	33.170	32.687	34.200	
k_3	35.107	38.303	31.973	
R	4.944	10.853	2.227	

该试验确定了超声时间、超声功率、药材粉碎目数对岩白菜素提取率的影响规律,采用正交试验得出了岩

白菜素的最佳提取工艺为超声功率 70 W、药材粉碎目数 100 目、超声时间 40 min,影响因素的主次顺序依次为药材粉碎目数、超声时间、超声功率。可见,该方法具有操作简单、省时、提取率高等特点,为岩白菜的进一步开发研究提供试验依据。

参考文献

- [1] 中华人民共和国药典委员会. 中国药典:一部[S]. 北京:化学工业出版社,2015:211.
- [2] 高辉,黎云祥,权秋梅,等. 药用植物中岩白菜素提取工艺的研究进展[J]. 光谱实验室,2013,30(1):94.
- [3] 董成梅,杨丽川,邹澄,等. 岩白菜素的研究进展[J]. 昆明医学院学报,2012,21(1):39-41.
- [4] 薛峰,李春娜,李朋收,等. 超声提取在中药化学成分提取中的应用[J]. 中国实验方剂学杂志,2014,20(18):231-234.
- [5] 赵建国,罗瑞芳. 岩白菜素的提取新工艺[J]. 中国医药工业杂志,1991,22(8):346-347.
- [6] 夏从龙,刘光明,马晓臣. 岩白菜素的研究进展[J]. 时珍国医国药,2006,17(3):432-433.
- [7] 王刚,麻兵继. 岩白菜素的研究概况[J]. 安徽中医学院学报,2002,21(6):59-62.
- [8] 段志敏,刘国清,刘松愈. 用高效反相液相色谱法测定岩白菜素[J]. 云南大学学报(自然科学版),1991,13(3):277-279.
- [9] 纪兰菊. 西藏产两种岩白菜中岩白菜素的 HPLC 测定[J]. 西北植物学报,2005,25(2):397-399.
- [10] 张甜,郝南明,董学畅,等. 微柱高效液相色谱法测定岩白菜素含量的研究[J]. 云南民族大学学报(自然科学版),2005,14(2):128-130.