

# 土壤有机碳和无机碳耦合关系研究进展

张力<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 干旱、半干旱地区土壤碳库由土壤有机碳(SOC)和无机碳(SIC)组成。由于土壤有机碳和无机碳之间存在耦合关系, 有机碳含量变化可能会导致无机碳含量变化, 反之亦然。过去农田土地管理和退耕还林等措施增加碳库侧重土壤有机碳, 但是由于土壤有机碳和无机碳耦合关系机理尚不清楚, 土壤有机碳增加可能对土壤无机碳造成的影响了解不足, 不利于精确估算土壤碳汇变化情况。总结土壤有机碳和无机碳耦合关系情况, 并从土壤有机碳向无机碳转移、土壤无机碳对土壤有机碳的保护作用等方面探究土壤有机碳和无机碳耦合机理, 并提出未来研究需要加强的几个方面。

**关键词** 土壤有机碳; 土壤无机碳; 耦合关系; 碳汇

**中图分类号** S153.6 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2017)32-0121-03

## Research Progress of Relationship between Soil Organic Carbon and Soil Inorganic Carbon

**ZHANG Li<sup>1,2</sup>** (1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

**Abstract** In arid and semi-arid region, soil organic carbon (SOC) pool and soil inorganic carbon (SIC) pool are equally important component of soil carbon pool. Due to the relationship between soil organic carbon and soil inorganic carbon, the variation of SOC may affect the content of SIC, vice versa. In the foretime, land management of farmland, return farmland to forests and grassland usually emphasize to increase SOC content, but limited information was available about SIC result from the change of SOC. In a word, little was known about the relationship between SOC and SIC. It was unfavorable for accurate estimating potential carbon sink. The relationship between SOC and SIC was summarized. According to the transfer SOC to SIC and protective effect of SIC on SOC, the mechanism of the relationship between SOC and SIC was explored, and finally brought forward some suggestions relating the research of the relationship between SOC and SIC.

**Key words** Soil organic carbon; Soil inorganic carbon; Relationship; Carbon sink

大气二氧化碳浓度升高导致全球变暖越来越引起人类的重视, 其中土壤碳参与全球碳循环具有巨大的碳汇潜力<sup>[1]</sup>。土壤碳库是陆地系统最大的碳库, 轻微变化都会导致大气二氧化碳浓度的巨大改变<sup>[2]</sup>。土壤碳库可以分为土壤有机碳和土壤无机碳, 其中无机碳主要指碳酸盐。由于土壤有机碳在土壤肥力等方面的作用, 最初的土壤碳库大多仅仅指土壤有机碳库<sup>[3]</sup>。随着土壤碳库研究的深入, 干旱半干旱地区日益受到重视, 该地区土壤有机碳含量远低于土壤无机碳, 致使越来越多人研究土壤无机碳库<sup>[4]</sup>。为更好地了解土壤碳库的碳汇潜力, 人们通过农田土地管理和土地利用变化, 从动态角度研究土壤碳循环。其中退耕还林还草, 是人类增加土壤碳汇的重要手段之一<sup>[5]</sup>。

Schlesinger<sup>[6]</sup> 研究影响农田土壤碳汇的几种耕作方式包括灌溉、施用无机氮、钙离子、有机肥等。由此发现, 施肥可增加土壤有机物质积累速率, 但通常忽略使用无机肥会释放二氧化碳。在干旱地区灌溉可能会增加陆地生物量, 但是灌溉增加土壤碳汇必须扣除抽水灌溉能量损耗产生的二氧化碳及次生碳酸盐形成时释放的二氧化碳。所以 Schlesinger<sup>[6]</sup> 认为农业土地施肥不会产生碳净增加量。由此可知, 同一自然或人类活动因素造成土壤有机碳或无机碳含量的增加并不必然导致土壤总碳库增加, 土壤总碳库增加量也不简单等于土壤有机碳或无机碳的增加量。要考虑土壤有机碳或无机碳含量变化对对方的影响——土壤有机碳和无机碳耦合

关系。为了更精确估算土壤碳汇潜力, 有必要研究土壤有机碳和无机碳耦合关系。

### 1 土壤有机碳和无机碳耦合关系

国内外大量研究表明, 土壤有机碳和无机碳存在负相关关系。自然环境中研究发现古尔班通古特沙漠边缘灰漠土中, 土壤有机碳含量从表层向下增幅增大, 而无机碳变化趋势相反<sup>[7]</sup>。陇中黄土高原灰钙土土壤有机碳随土层深度增加而减少, 土壤无机碳含量随剖面深度增加而增加<sup>[8]</sup>。植树造林影响土壤有机碳和无机碳, 黄土高原发现剖面 20 cm 内植树造林增加土壤有机碳, 减少土壤无机碳<sup>[9]</sup>。土壤有机碳、无机碳含量与土壤理化性质存在相关性, 东北均腐土和淋溶土纲发现表层土壤全氮、碱解氮、速效磷、速效钾、钾离子交换量、三氧化二铁、五氧化二磷、总孔隙度均与土壤有机碳含量呈正相关, 而土壤 pH、容重与土壤有机碳呈负相关, 与无机碳呈正相关<sup>[10]</sup>。

但也有研究显示, 土壤有机碳和无机碳存在正相关关系。农地中有研究发现黄土高原旱地不同种植模式下, 与休闲土壤相比, 不同作物长期连作或轮作显著提高 0~40 cm 土层各种形态碳的质量分数, 有机碳提高 47%~139%, 无机碳提高 20%~26%<sup>[11]</sup>。张宁等<sup>[12]</sup> 发现, 自然环境中腾格里沙漠淡棕钙土中有机质的分布格局与碳酸钙的分布格局大体相同, 土壤碳酸钙含量与土壤有机质含量均呈显著正相关关系, 且变化趋势相同; 土壤碳酸钙空间异质性的变化与有机质空间异质性的变化具有一致性。

土壤有机碳和无机碳耦合关系还受相关因素的影响。例如降水, 黄土高原表层土壤有机碳和无机碳耦合关系, 在

年平均降水量 500 ~ 800 mm 的降雨带呈负相关, 300 ~ 500 mm 的降雨带无明显相关性, 小于 300 mm 降雨带呈正相关<sup>[13]</sup>。综上所述, 土壤有机碳和无机碳的耦合现象比较复杂, 目前尚没有系统的耦合关系机理。

## 2 土壤有机碳向无机碳转移

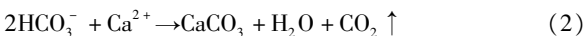
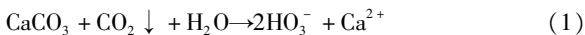
土壤有机碳向无机碳转移分为 2 种类型, 一种为 SOC - CaCO<sub>3</sub>; 另一种为 SOC - CO<sub>2</sub> - CaCO<sub>3</sub>。在干旱、半干旱地区以后者为主, 人们对土壤有机碳向无机碳转移的研究亦是以后者为主。

**2.1 SOC - CaCO<sub>3</sub>** 动植物残体和有机质可以直接形成土壤无机碳<sup>[14]</sup>。植物地上部分组织中的确含有碳酸钙<sup>[15]</sup>, 这些碳酸钙以钟乳体的形式存在于植物的晶细胞中。碳酸钙晶体在围绕根毛的根套中形成<sup>[16]</sup>。当植物的枯枝落叶分解返回到土壤后, 有机质中的碳酸钙确实返回到土壤中参与次生碳酸钙的形成。Okazaki 等<sup>[17]</sup>进一步估算出植物叶片中碳酸钙含量大约为 0.4 mg/cm<sup>2</sup>, 最高值达到 1.06 mg/cm<sup>2</sup>。

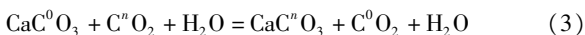
## 2.2 SOC - CO<sub>2</sub> - CaCO<sub>3</sub>

**2.2.1 SOC - CO<sub>2</sub> - CaCO<sub>3</sub> 转移现象及原理。**大量研究发现存在土壤有机碳向无机碳转移的现象。新疆干旱土表层中有机碳参与新淀积方解石的形成<sup>[18]</sup>。甘肃灰钙土中, 土壤有机碳含量 70% 分布于地表下 20 ~ 40 cm, 而这一深度恰好是方解石积聚的起始位置<sup>[19]</sup>。张雪妮等<sup>[20]</sup>发现, 在剖面上土壤无机碳有波动性增加的趋势, 认为是一定历史时期内植物根系处土壤有机碳向土壤无机碳转化的贡献。有学者利用 C<sup>14</sup> 计算了次生碳酸盐的生成速度, 对比有根作用和无根作用 2 种方式下生成速度, 有根参与是无根参与的 2 倍<sup>[21]</sup>。

次生碳酸盐形成机理的核心为原生碳酸盐在土壤二氧化碳和土壤水分参与下形成次生碳酸盐, 具体反应方程式如下<sup>[22]</sup>:



在此过程中, 土壤 CO<sub>2</sub> 和 CaCO<sub>3</sub> 中 C 发生交换:



这里 CaC<sup>0</sup>O<sub>3</sub> 中 C<sup>0</sup> 是来自土壤母质的古碳, 而 C<sup>n</sup> 是来自植物呼吸和植物残体、土壤有机碳的分解产生的新碳<sup>[23]</sup>。通过原生碳酸盐向次生碳酸盐的转化, 新碳逐步取代古碳, 土壤有机碳逐步转化为土壤无机碳, 简化为 SOC - CO<sub>2</sub> - CaCO<sub>3</sub>。

**2.2.2 SOC - CO<sub>2</sub> - CaCO<sub>3</sub> 转移定量分析。**碳稳定同位素是定量研究 SOC 向 SIC 的转移机理最常见方法<sup>[24]</sup>。土壤中二氧化碳和碳酸盐之间一直进行着碳稳定同位素的分馏交换, 随时间延长土壤中碳酸盐中 δ<sup>13</sup>C 值, 将由主要取决于母质变为主要取决于土壤中二氧化碳<sup>[25]</sup>, 所以根据土壤无机碳 δ<sup>13</sup>C 值可以判断土壤有机碳是否向土壤无机碳转移及转移的程度。植物通过光合作用合成的有机化合物富集<sup>12</sup>C, 植物作用参与形成的物质 δ<sup>13</sup>C 偏小。土壤有机碳源于植物, 其 δ<sup>13</sup>C 值反映的是长期平衡的生物状况。土壤无机碳包括

原生和次生碳酸盐, 其中原生碳酸盐来自母质, 其 δ<sup>13</sup>C 值反映母质状况; 次生碳酸盐是原生碳酸盐在土壤二氧化碳和水的作用下重融再结晶的产物。所以次生碳酸盐中碳的来源是植物和大气, 与土壤有机碳同源, 其 δ<sup>13</sup>C 值反映大气和植物状况。所以根据土壤有机碳、土壤无机碳和母质碳酸盐的 δ<sup>13</sup>C 值的相关关系, 可定量研究土壤有机碳向无机碳转移。

一些研究者基于土壤有机碳向无机碳转化机理 (SOC - CO<sub>2</sub> - SIC) 通过土壤 CO<sub>2</sub> 或土壤有机碳间接计算次生碳酸盐 δ<sup>13</sup>C。根据 Cerling<sup>[26]</sup> 和 Quade 等<sup>[27]</sup> 提出的扩散模型计算次生碳酸盐 δ<sup>13</sup>C 值公式如下:

$$\delta^{13}\text{C}(\text{pc}) = \alpha(\text{CO}_2 - \text{C}_a\text{CO}_3) \times (\delta^{13}\text{C}(\text{organic}) + 1004.4) - 1000 \quad (4)$$

其中, α(CO<sub>2</sub> - C<sub>a</sub>CO<sub>3</sub>) 是 CO<sub>2</sub> - CaCO<sub>3</sub> 系统中的分离系数, δ<sup>13</sup>C(organic) 是土壤有机碳的 δ<sup>13</sup>C 值, 1004.4 是土壤 CO<sub>2</sub> 和土壤呼吸产生 CO<sub>2</sub> 之间的差值<sup>[28]</sup>。

α(CO<sub>2</sub> - C<sub>a</sub>CO<sub>3</sub>) 可以通过 Deines 等<sup>[29]</sup> 提出的计算公式如下:

$$1000 \ln \alpha(\text{CO}_2 - \text{C}_a\text{CO}_3) = -3.63 + (1.194 \times 10^6) / T^2 \quad (5)$$

其中, T 是研究区年平均开氏温度。

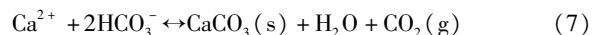
Laudicina 等<sup>[30]</sup> 对土壤有机碳 δ<sup>13</sup>C 值和次生碳酸盐 δ<sup>13</sup>C 值进行回归分析, 发现两者相关程度很高。

利用 δ<sup>13</sup>C 值区分原生碳酸盐和次生碳酸盐, 总无机碳酸盐中次生碳酸盐所占比例方程:

$$\text{PC}(\%) = [\delta^{13}\text{C}(\text{Soil}) - \delta^{13}\text{C}(\text{pm})] / [\delta^{13}\text{C}(\text{PC}) - \delta^{13}\text{C}(\text{pm})] \times 100 \quad (6)$$

其中, PC(%) 是总无机碳酸盐中的次生碳酸盐所占比例; δ<sup>13</sup>C(soil) 是某一土层土壤无机碳的 δ<sup>13</sup>C 测定值; δ<sup>13</sup>C(PC) 是次生碳酸盐的 δ<sup>13</sup>C 值, 土壤次生碳酸盐 δ<sup>13</sup>C 值主要取决于土壤有机碳; δ<sup>13</sup>C(pm) 是母质碳酸盐的 δ<sup>13</sup>C 测定值。

因为次生碳酸盐的 δ<sup>13</sup>C 值受 SOC - CO<sub>2</sub> - CaCO<sub>3</sub> 系统影响, 所以估算出次生碳酸盐含量, 通过化学方程式:



可计算出参与反应的二氧化碳的量。最后估算出参与反应的土壤二氧化碳中来自土壤有机碳分解释放的二氧化碳所占的比例, 进而推算出通过介质“CO<sub>2</sub>”土壤有机碳向土壤无机碳转移的碳量<sup>[31]</sup>。

干旱、半干旱地区只有 5% ~ 10% 的次生碳酸盐来源于有机碳<sup>[32]</sup>。内蒙古均腐土中大约有 3 g/kg 的土壤无机碳来源于有机碳<sup>[33]</sup>。而内蒙古中西部四子王旗荒漠草原土壤 10 ~ 30 cm 土层次生碳酸盐所占比例为 99%, 30 ~ 50 cm 土层 47%、50 ~ 60 cm 土层 36%<sup>[34]</sup>, 定量分析此地区土壤有机碳向无机碳的转化, 发现 1 kg 土壤中平均有 11.1 ~ 14.0 g CaCO<sub>3</sub> 中的碳来自土壤有机碳的分解转化。但是由于没有考虑到次生碳酸盐形成过程中来源于母质的古碳的去处, 如果其释放重回大气, 那么土壤有机碳向无机碳转移并没有截存大气二氧化碳, 因此土壤有机碳向无机碳转移后实际截存

的大气二氧化碳数量难以评估。

### 3 土壤无机碳对土壤有机碳的保护作用

土壤中无机碳以碳酸钙为主。有人发现不论天然钙或是人工添加钙,含钙土壤比不含钙土壤保存有更多有机碳<sup>[35]</sup>,原因尚没有统一解释。一些人认为有机碳在含钙土壤中含量高,归因于钙离子对腐殖质的作用<sup>[36]</sup>。还有人认为可能与土壤团聚体有关。碳酸钙有利于土壤团聚体的形成,但是作用机制比较复杂,具体包括以下几方面:①胶粒带负电因而相互排斥,如果在胶体溶液中加入钙离子可使胶体表面电位势降低,有利于形成微凝聚体;带正电荷的钙离子与带负电荷的胶体相互吸引产生凝聚作用;②钙离子是非常重要的胶结剂<sup>[37]</sup>,碳酸钙等无机化合物能胶结土粒;③钙离子可以充当黏土矿物和腐殖物质之间键桥,我国北部的中性和石灰性土壤主要以钙键桥结合腐殖质为主形成有机无机复合体,有机无机复合体是土壤团聚体形成的基本单元。很多研究发现,钙键有利于微团聚体的形成和稳定<sup>[38]</sup>。原生碳酸盐溶解再沉淀过程有利于含钙土壤中大团聚体的形成<sup>[39]</sup>,次生碳酸盐在大团聚体内部或外部形成钙膜有利于形成大团聚体。

### 4 展望

越来越多科学家重视农田管理和土地利用对增加土壤碳汇的作用。但是大部分研究多是单独研究土壤有机碳库和无机碳库,土壤总碳库仅为土壤有机碳库和无机碳库的简单相加,忽略了土壤有机碳和无机碳之间的耦合关系可能对土壤总碳库的影响,若土壤有机碳和无机碳负相关,那么土壤有机碳增加可能导致土壤无机碳含量的降低,从而使总碳库容量小于预期值。今后在农田管理和土地利用变化对土壤碳库影响的研究,应考虑当地土壤有机碳和无机碳耦合关系及影响因素,通过人为活动使土壤有机碳和无机碳尽可能正相关,至少降低负相关程度,以求得最大土壤碳汇。

土壤有机碳和无机碳耦合关系比较复杂,存在负相关、正相关和不相关 3 种情况,由于土壤有机碳和无机碳耦合机理尚不清楚,具体地域土壤有机碳和无机碳耦合关系了解不足。今后应进一步研究不同地域环境下土壤有机碳和无机碳耦合关系,为研究土壤有机碳和无机碳耦合机理奠定基础。

土壤有机碳库向无机碳库转移的定量分析,由于没有考虑到次生碳酸盐形成过程中来源于母质的古碳的去处,如果其释放重回大气,那么土壤有机碳向无机碳转移并没有截存大气二氧化碳,因此土壤有机碳向无机碳转移后实际截存的大气二氧化碳数量难以评估。今后应定量研究次生碳酸盐形成过程中来源于母质的古碳的去处,为精确估算土壤有机碳向无机碳转移后实际截存的大气二氧化碳提供依据。

### 参考文献

[1] 潘根兴,周萍,李恋卿,等.固碳土壤学的核心科学问题与研究进展[J].土壤学报,2007,44(2):327-337.  
[2] IPCC. Land use, land use change, and forestry[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.  
[3] 刘满强,胡锋,陈小云.土壤有机碳稳定机制研究进展[J].生态学报,2007,27(6):2642-2649.  
[4] 王海荣,杨忠芳.土壤无机碳研究进展[J].安徽农业科学,2011,39

(35):21735-21739.  
[5] WU H B, GUO Z T, PENG C H. Land use induced changes of organic carbon storage in soils of china[J]. Global change biology, 2003, 9(3): 305-315.  
[6] SCHLESINGER W H. Carbon sequestration in soils; Some cautions amidst optimism[J]. Agriculture, ecosystems and environment, 2000, 82(1/2/3): 121-127.  
[7] 荣井荣,李晨华,王玉刚,等.长期施肥对绿洲农田土壤有机碳和无机碳的影响[J].干旱区研究,2012,29(4):592-597.  
[8] 张丽华,谢忠奎,王亚军,等.陇中黄土高原土地利用变化对土壤有机碳、无机碳的影响[J].土壤通报,2013,44(2):369-375.  
[9] CHANG R Y, FU B J, LIU G H, et al. The effects of afforestation on soil organic and inorganic carbon: A case study of the loess plateau of china[J]. Catena, 2012, 95: 145-152.  
[10] 祖元刚,李冉,王文杰,等.我国东北土壤有机碳、无机碳含量与土壤理化性质的相关性[J].生态学报,2011,31(18):5207-5216.  
[11] 李小涵,王朝辉,郝明德,等.黄土高原旱地不同种植模式土壤碳特征评价[J].农业工程学报,2010,26(S2):325-330.  
[12] 张宁,何兴东,郭良.腾格里沙漠 3 种土壤有机质和碳酸钙特征[J].生态学报,2009,29(8):4094-4102.  
[13] 曹华.黄土高原土壤有机碳与无机碳耦合关系初步探讨[M].武汉:华中农业大学,2012.  
[14] 张刚生,谢先德. CaCO<sub>3</sub> 生物矿化的研究进展:有机质的控制作用[J].地球科学进展,2000,15(2):204-209.  
[15] MIAO L L, YEN T B, KUO L L. Formation of calcium carbonate deposition in the cotyledons during the germination of *Justicia procumbens* L. (acanthaceae) seeds[J]. Taiwania, 2004, 49(4):250-262.  
[16] PHILLIPS S E, MILNES A R, FOSTER R C, et al. Calcified filaments: An example of biological influences in the formation of ealeretes in south australia[J]. Australian J Soil Res, 1987, 25: 405-428.  
[17] OKAZAKI M, SETOGUCHI H, AOKI H, et al. Application of soft x-ray micro-radiography to observation of eystoliths in the leaves of various higher plants[J]. Journal of plant research, 1986, 99(3): 281-287.  
[18] 雷文进,顾国安.中国干旱土发生及主要诊断层划分依据[M]//龚子同.土壤系统分类研究: b 辑.中国土壤系统分类探索.北京:科学出版社,1992:73-98.  
[19] 胡双熙.兰州地区灰钙土的发育与全新世环境变化[M]//龚子同.土壤环境变化.北京:中国科学技术出版社,1992:43-45.  
[20] 张雪妮,吕光辉,贡璐,等.新疆艾比湖湿地自然保护区不同土壤类型无机碳分布特征[J].中国沙漠,2013,33(4):1084-1090.  
[21] GÖCKE M, KUZYAKOV Y. Effect of temperature and rhizosphere processes on pedogenic carbonate recrystallization: Relevance for paleoenvironmental applications[J]. Geoderma, 2011, 166(1): 57-65.  
[22] WU H B, GUO Z T, GAO Q, et al. Distribution of soil inorganic carbon storage and its changes due to agricultural land use activity in China[J]. Agric Ecosyst Environ, 2009, 129(4): 413-421.  
[23] KUZYAKOV Y, SHEVITZOVA E, PUSTOVOYTOV K. Carbonate re-crystallization in soil revealed by <sup>14</sup>C labeling: Experiment, model and significance for paleo-environmental reconstructions [J]. Geoderma, 2006, 131(1/2): 45-58.  
[24] 黄成敏,王成善,艾南山.土壤次生碳酸盐碳氧稳定同位素古环境意义及应用[J].地球科学进展,2003,18(4):619-622.  
[25] 朱书法,刘从强,陶发祥,等.喀斯特地区土壤有机质的稳定碳同位素地球化学特征[J].地球与环境,2006,34(3):51-58.  
[26] CERLING T E. The stable isotopic composition of modern soil carbonate and its relationship to climate[J]. Earth and planetary science letters, 1984, 71(2): 229-240.  
[27] QUADE J, CERLING T E, BOWMAN J R, et al. Systematic variations in the stable carbon and oxygen isotopic composition of pedogenic carbonate along elevation transects in the southern Great Basin USA[J]. Geological society of america bulletin, 1989, 101: 464-475.  
[28] CRAIG H. Isotopic standards for carbon and oxygen and correction for mass spectrometric analysis of carbon dioxide[J]. Geochimica et cosmochimica acta, 1957, 12(1): 133-149.  
[29] DEINES P, LANGMUIR D, HARMON R S. Stable carbon isotope ratios and the existence of a gas phase in the evolution of carbonate ground waters[J]. Geochimica et cosmochimica acta, 1974, 38(7): 1147-1164.  
[30] LAUDICINA V A, SCALENGHE R, PISCIOITTA A, et al. Pedogenic carbonates and carbon pools in gypsiferous soils of a semiarid Mediterranean environment in south Italy[J]. Geoderma, 2013, 192: 31-38.

脆碎度和崩解度都符合规定。

#### 4 展望

人类对多糖的研究已有上百年的历史,早期的研究与蛋白、核酸同步。近年来,随着分子生物学、生物化学等多个学科的发展,多糖的生物活性逐渐被人们所发现和认识到。党参多糖的研究虽然起步较早,但早期这些研究主要集中在党参总多糖含量测定和党参多糖的药理作用上。因此,当前党参多糖的研究仍存在以下问题:很难从分子水平上阐明作用机制和药理作用;多糖的化学结构不明确,构效关系不清楚。今后应加强对党参多糖的应用研究,开发出市场前景好的医疗、保健产品,对党参多糖的进一步深入研究将有利于促进中药现代化的进程,能更好地为人类健康服务。

#### 参考文献

- [1] 孙政华,邵晶,郭斌. 党参化学成分及药理作用研究进展[J]. 安徽农业科学,2015,43(33):174-176.
- [2] 许爱霞,张振明,葛斌,等. 党参多糖抗衰老作用机制的实验研究[J]. 中国现代应用药学,2006,23(8):729-731.
- [3] 宋艺君,郭涛. 党参多糖提取纯化工艺的研究[J]. 现代中医药,2010,30(3):77-78.
- [4] 韩凤梅,程伶俐,陈勇. 板桥党参多糖的分离纯化及组成研究[J]. 中国药理学杂志,2005,40(18):1381-1383.
- [5] 武冰峰. 党参多糖的分离纯化、理化性质与生物活性研究[D]. 贵阳:贵州大学,2007.
- [6] 任丽清,张静,刘志存,等. 党参多糖的分离纯化及其结构研究[J]. 中草药,2008,39(7):986-989.
- [7] 李瑞燕. 党参水溶性多糖的提取工艺研究[D]. 太原:山西医科大学,2007.
- [8] 李贵荣,杨胜圆. 党参多糖的提取及其对活性氧自由基的清除作用[J]. 化学世界,2001,42(8):421-422,434.
- [9] 杜清,秦民坚,郭巧生. 明党参多糖提取工艺研究[J]. 现代中药研究与实践,2005,19(4):51-53.
- [10] 鲍智娟. 轮叶党参多糖提取及其含量测定[J]. 延边大学学报(自然科学版),2009,35(4):350-352.
- [11] 余兰,陈华,娄方明. 超声波辅助提取洛党参多糖的工艺优化[J]. 食品与机械,2010,26(6):135-137.
- [12] 范济民,蒋小丽,赵志换. 山西党参多糖提取工艺的优化[J]. 化学与生物工程,2012,29(9):47-50.
- [13] 陈韩英,廉宜君,陈韩飞,等. 正交设计法优化复方党参中多糖的提取工艺[J]. 中国医院药学杂志,2010,30(2):102-104.
- [14] 张锐,张旭,刘建群,等. 党参的亚临界水提取工艺优选[J]. 中国实验方剂学杂志,2013,19(10):34-37.
- [15] 王秀文,王颖莉,裴晓丽,等. 均匀设计法优选党参茯苓水溶性多糖的微波提取工艺[J]. 中国实验方剂学杂志,2012,18(4):24-27.
- [16] 王颖莉,王秀文,曾冬明,等. 四君子汤(党参)多糖的微波法提取工艺及其光谱分析[J]. 中国实验方剂学杂志,2012,18(16):77-80.
- [17] 岳显文. 党参酶解提取工艺优化[J]. 黑龙江医药,2011,24(5):743-744.
- [18] 张驰,朱玉昌,周大寨. 板党多糖酶法提取研究[J]. 食品科学,2008,29(11):308-311.

- [19] 周大寨,朱玉昌,黄卫,等. 复合酶法提取板党多糖的研究[J]. 时珍国医国药,2009,20(8):1928-1929.
- [20] 伍春. 党参多糖对 D-半乳糖致衰老小鼠皮肤抗氧化作用及基因表达谱的影响[D]. 兰州:甘肃中医学院,2014.
- [21] 许爱霞,张振明,葛斌,等. 党参多糖抗衰老作用机制的实验研究[J]. 中国现代应用药学,2006(S2):729-731.
- [22] 熊元君,陈敏,李晓瑾,等. 新疆党参多糖对 SOD、MDA 的影响[J]. 新疆中医药,2000(3):13.
- [23] 官存杞,张君,赵娟,等. 新疆党参多糖的制备及体内抗肿瘤作用的研究[J]. 农垦医学,2007,29(6):404-406.
- [24] 韩春姬,李铭万,李莲姬,等. 轮叶党参多糖对小鼠 S<sub>180</sub> 肉瘤的抑制作用[J]. 延边大学医学学报,2000(4):249-250.
- [25] 朱瑞. 党参多糖的分析及抗肿瘤活性研究[D]. 长春:东北师范大学,2013.
- [26] 武静莲,徐强,谢亲建,等. 党参抗肿瘤药理作用研究[J]. 西部中医药,2016,29(8):18-21.
- [27] 冯浩丽,高建平. 党参多糖体内抗肿瘤活性研究及急性毒性实验[J]. 山西中医,2012,28(8):49-50.
- [28] 张振东,杨娟,吴兰芳,等. 神经营养因子样土党参多糖促进小鼠学习记忆作用的实验研究[J]. 时珍国医国药,2011,22(8):1845-1847.
- [29] 张振东,吴兰芳,景永帅,等. 党参多糖对小鼠学习记忆作用研究[J]. 山地农业生物学报,2010,29(3):242-245.
- [30] 龚其海,赵万,余兰,等. 两种党参多糖对小鼠免疫功能影响的比较[J]. 遵义医学院学报,2012,35(4):267-270.
- [31] 林丹丹,秦磊,任喆,等. 硒化党参多糖对免疫抑制小鼠免疫功能的影响[J]. 中国畜牧兽医,2016,43(6):1544-1549.
- [32] 杨光,李发胜,刘辉,等. 党参多糖对小鼠免疫功能的影响[J]. 中药药理与临床,2005,21(4):39.
- [33] 赵晓芳. 板党多糖对溃疡性结肠炎大鼠的防治作用及机制研究[D]. 武汉:湖北中医药大学,2016.
- [34] 田先翔,赵晓芳,吴勇,等. 板党多糖对溃疡性结肠炎大鼠的防治作用及其分子机制研究[J]. 中国实验方剂学杂志,2016(10):107-112.
- [35] 周卫东,项磊,卢汉琪,等. 党参多糖改善 5-氟尿嘧啶诱导小鼠结肠黏膜炎的实验研究[J]. 辽宁中医杂志,2016(7):1495-1498.
- [36] 武冰峰,杨娟,谢红,等. 党参多糖对神经干细胞硫代硫酸钠损伤的保护作用[J]. 时珍国医国药,2008,19(2):280-281.
- [37] 孙玉,李伟,孙英莲,等. 党参多糖对中枢神经系统的影响[J]. 吉林中医药,1989(5):36-37.
- [38] 彭梅,张振东,杨娟. 土党参多糖对小鼠的抗疲劳作用[J]. 食品科学,2011,32(19):224-226.
- [39] 王峰涛,徐国钧. 中药党参类对动物耐疲劳及抗缺氧作用的影响[J]. 植物资源与环境,1992(3):10-14.
- [40] 傅盼盼. 党参多糖降血糖作用及其机制的研究[D]. 长春:吉林大学,2008.
- [41] 杨鲜. 党参复合保健饮料的研制[D]. 重庆:西南大学,2015.
- [42] 张新国,曾艳龙,陈文洁,等. 党参多糖钙的制备及鉴别[J]. 中药材,2011,34(1):137-139.
- [43] 张新国,陈文洁,曾艳龙,等. 党参多糖铁的合成及鉴别[J]. 中国药学报,2011,39(1):77-81.
- [44] 杨静. 不同产地党参质量比较及党参多糖滴丸的研究[D]. 太原:山西医科大学,2010.
- [45] 侯丽丽,晏永新,蔡美萍,等. 党参多糖口服液抗应激及抗炎作用的研究[J]. 中国兽药杂志,2013,47(11):37-39.
- [46] 李早慧,王建国. 党参多糖片的制备及其质量考察[J]. 黑龙江畜牧兽医,2015(23):206-208.

(上接第 123 页)

- [31] 张林,孙向阳,曹吉鑫,等. 西北干旱区森林和草原 SOC 向 SIC 转移的研究进展[J]. 西北林学院学报,2010,25(2):40-44.
- [32] CAPO R C, CHADWICK O A. Application of strontium isotopes to the mass balance of calcium in desert soils: Eolian input vs in-situ weathering[J]. Geological Society of America Abstract with Program,1993,25:394.
- [33] 乌力更,李霞,陈晓远. 全新世以来内蒙古黑垆土的历史演变[M]//陆景冈. 土壤地质(第四辑). 北京:中国农业出版社,1997:27-32.
- [34] 张林,孙向阳,曹吉鑫,等. 内蒙古荒漠草原土壤有机碳向土壤无机碳酸盐的转移[M/OL]. 北京:中国科技论文在线(2009-02-10)[2017-07-11]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/200902-303>.
- [35] CLOUGH A, SKJEMSTAD J O. Physical and chemical protection of soil organic carbon in three agricultural soils with different contents of calcium

- carbonate[J]. Soil research,2000,38(5):1005-1016.
- [36] DÍAZ-HERNÁNDEZ J L, FERNÁNDEZ E B, GONZÁLEZ J L. Organic and inorganic carbon in soils of semiarid regions: A case study from the Guadix-Baza basin (Southeast Spain) [J]. Geoderma,2003,114(1/2):65-80.
- [37] MORENO F, MURILLO J M, PELEGRÍN F, et al. Long-term impact of conservation tillage on stratification ratio of soil organic carbon and loss of total and active CaCO<sub>3</sub> [J]. Soil and tillage research,2006,85(1/2):86-93.
- [38] BALDOCK J A, SKJEMSTAD J O, DERENNE S, et al. Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack[J]. Org Geochem,2000,31(7/8):697-710.
- [39] FERNÁNDEZ-UGALDE O, IÑIGO V, BARRÉ P, et al. Effect of carbonates on the hierarchical model of aggregation in calcareous semi-arid Mediterranean soils[J]. Geoderma,2011,164(3):203-214.