土壤有机硫矿化研究进展

褚 磊[1,2],于君宝*,管 博[1]
(1. 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室(烟台海岸带研究所),山东省海岸带环境过程重点实验室,中国科学院烟台海岸带研究所,山东 烟台 264003;2.中国科学院大学,北京 100049)

摘 要:土壤有机硫矿化是硫生物地球化学循环关键过程之一,其过程具有复杂性和影响因素的多样性。在科学试验中,培养系统和方程模型的选择对研究硫矿化的准确性至关重要。综述了目前国内外土壤有机硫矿化研究中应用的主要 3 种培养系统和 6 个动力学方程模型,同时阐述了微生物和酶对有机硫矿化过程的直接影响和土壤的理化性质等因素的间接影响,以及各影响因素之间的相互协同作用,旨在了解土壤有机硫矿化特征、规律、机理、研究方法以及模拟模型的研究现状,并在此基础上,提出包括有机硫矿化模型的有效性、适用性以及有机硫矿化影响因素的联合作用在内的各方面需进一步深入探讨。

关 键 词:土壤有机硫;矿化过程;动力模型;影响因素
中图分类号:S153.6 文献标识码:A 文章编号:0564-3945(2014)01-0240-06

褚 磊,于君宝,管 博. 土壤有机硫矿化研究进展[J]. 土壤通报,2014,45(1):240-245
CHU Lei, JU Bao-yu, GUAN Bo. Advances on Organic Sulphur Mineralization of Soil [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(1): 240-245

硫是生物生长必需的大量营养元素之一,在许多活细胞生化反应中起着重要的作用。硫广泛分布于土壤中,其含量变化较大,一般在 30 ~ 10000 mg kg^{-1} 之间,平均值约为 700 mg kg^{-1}[1]。土壤中的硫以有机硫和无机硫形式存在。有机硫分成酯键硫(C-O-S)、碳键硫(C-S)和未知态有机硫或惰性硫(UO-S)3 种形态[2],土壤表层硫大部分以有机形态存在,但有机硫化合物不能直接被植物利用;无机硫则包括原生矿物中的硫、元素硫、硫酸盐等。硫酸盐是无机硫最主要的存在形式,一般可分为水溶态,吸附态,不溶态三种形态。植物从土壤所吸收的硫几乎都是无机形态的硫,而土壤中表层无机硫只占很小一部分[3]。近年来由于世界范围内低硫化肥的使用,以及相关法规对大气中硫排放的限制,导致植物缺硫。硫的缺乏使植物中氨基酸如蛋氨酸和半胱氨酸供应不足,阻碍了蛋白质和酶的合成,进而降低了植物的品质[4]。因此,土壤硫动力学和植物有效硫的研究正变得越来越重要。有机硫的矿化过程是连接土壤有机硫和无机硫的桥梁,是植物获得有效硫的重要途径,也是土壤硫循环的重要环节。这一过程是植物营养硫的主要的潜在供给来源,对于土壤潜在生产力的估算,了解不同土壤中有机硫的矿化速率和平衡水平的维持有很大价值[5]。本文从土壤硫的矿化过程和其研究方法及影响因素几个方面评述国内外土壤硫矿化的研究现状及存在问题,以期为深入研究硫元素的生物地球化学过程及其合理利用提供参考。

1 土壤硫矿化过程

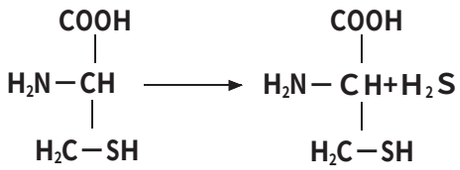
硫是植物的重要营养元素,土壤中的硫以硫酸盐形式被植物吸收。无机硫相对于有机硫含量很少,有机硫在被植物利用前必须经过硫酸酯酶对酯键硫的催化作用或者微生物对碳键硫的分解作用被矿化成无机的硫酸盐[6]。土壤硫的矿化过程主要分为生物化学矿化和生物学矿化两个路径[7]。生物化学矿化是指当土壤硫酸盐含量低时,土壤微生物和植物根系会产生一种硫酸酯酶,它能够水解硫酸酯化合物中的硫酸盐,酯键硫在其催化作用下将 O-S 键断开[8]从而转化成硫酸盐,反应过程见公式 1。

$$R-C-SO_3+H_2O \xrightarrow{sulphatase} R-C-OH+H^+ + SO_4^{2-} \quad (1)$$

生物学矿化是指在有机碳提供能量的前提下,依靠微生物的活性将碳键硫矿化,此时硫的释放只是作为碳氧化的副产物[9]。碳键硫的矿化机理如公式 2 所示[4]。

收稿日期:2012-12-10;修订日期:2013-03-11
基金项目:山东省自然科学杰出青年基金项目(JQ201114)、中国科学院知识创新重要方向性项目(KZCX2-YW-359)、国家"十二五"科技支撑计划项目(2011BAC02B01)资助
作者简介:褚 磊(1988-),男,安徽合肥人,在读博士研究生,主要从事湿地生物地球化学与生态修复方面的研究。
*通讯作者:Email:junbaoyu@gmail.com; jbyu@yic.ac.cn

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



$H_2S \longrightarrow H_2 + S$

$S + O_2 + H_2O \longrightarrow H_2SO_3 + 1/2O_2 \longrightarrow H_2SO_4$　　(2)

酯键硫已经被证明是土壤有机硫中最不稳定的成分[10],却不一定是硫矿化的主要底物。Ghani 等[11]研究发现土壤中碳键硫的含量能很好的预测硫的矿化量(占土壤硫矿化的 59%),而硫的其它组分最多只能解释 29% ~ 47%,且 Freny 等[12]研究表明植物从土壤吸收的硫近 60%来源于碳键硫;另外,McLaren 和 Swift[13]发现硫以碳键硫形式从耕地中损失量达 75%。大部分研究均表明碳键硫是土壤中有机硫矿化的主要成分。但也有学者持不同观点,如有人认为土壤硫矿化主要来源于酯键硫的分解[14];甚至有人认为矿化的硫来源于所有组分的有机硫,没有任一组分有机硫充当矿化底物的主要来源[15]。

2　土壤有机硫矿化研究方法

2.1　有机硫矿化的培养系统

土壤有机硫矿化目前常用的方法主要有封闭培养系统法[16~18],开放培养系统法[5,7,19~27]以及盆栽培养系统法[12,15,28]。在开放培养系统中,矿化的硫酸盐被洗提液定期从土壤中洗脱,这能更好模拟自然条件下矿化的硫被植物利用或被淋洗损耗的过程[11,19];在封闭培养系统中,不对土壤矿化硫进行定期洗提,硫酸盐在土壤中累积,此系统适合模拟闲置没有植物的半湿润土壤硫的矿化[20]。在土壤－植物系统中,封闭培养系统中 在土壤中积累可能抑制催化酯键硫矿化的芳基硫酸酯酶活性[22],因此利用分段淋洗方法的开放培养系统法相对于封闭培养系统法能够避免硫酸盐在土壤中的累积对硫矿化的影响[5,19]。另外,分为有植物与无植物的两种类型的盆栽培养系统法也能较好的反映土壤—植物系统中硫的矿化。Pamidi 等[29]在比较开放培养系统、无植物盆栽培养系统和有植物盆栽培养系统的三种方法的硫矿化试验中,发现有植物盆栽培养系统法相比开放培养系统法能更好的模拟预测土壤矿化的植物有效硫。

开放培养系统法与另外两种培养系统法相比,试验标准尚不统一,且在不同研究中应用差异较大。如有些学者为了避免土壤前期风干处理对微生物的影响[11]和土壤的干燥再湿润引起硫的突然矿化[16],对试验土壤进行预培养[24,29~31],但同时也有很多研究不进行预培养[14,21,25~27,32~34];对于开放培养系统矿化硫的提取,大部分研究使用氯化物作为提取剂[14,21,26,32],也有学者为了模拟自然情况下硫的淋洗,用雨水[30]替代氯化物;此外,由于矿化硫可能被土壤吸附,有些研究在最后一次淋洗中除氯化物外还用磷酸盐来洗脱[24,25,27,29,30],计算时将得到的吸附硫按比例分配到之前淋洗的矿化硫中,然而结果仍会存在一定误差。为应对前一种方法的局限,胡正义等在矿化的各个阶段同时利用氯化物和磷酸盐来提取矿化硫[31]。开放培养系统中,预培养是否采用、提取剂的选择尚无统一标准,且目前未有研究比较这几种不同试验条件对硫矿化结果的影响,因此开放培养系统法的准确性与可比性值得进一步探讨。

在 3 种培养系统法中,矿化硫的一部分有效硫一般用氯化物溶液(或)来提取[16, 35~39];另一部分矿化被土壤吸附的硫常采用不同强度的磷酸盐溶来洗脱[36,40]。但在用提取液对矿化硫进行淋洗时,除矿化硫、矿化氮、容易被矿化的有机氮被洗脱出外[41~43],还伴随着可溶性有机硫的释放,因此这一过程可能影响硫矿化结果的可靠性[33]。另外,还有方法用阴离子交换膜法来提取吸附的矿化硫[44],此法具有较高的选择性,能够扣除有机氮、硫的干扰,一般用于短期硫矿化试验。

2.2　硫矿化动力学方程模型

目前模拟土壤中硫矿化的动力学方程主要包括一级模型、零级模型、连续一级模型、Gompertz 模型等,具体模型见公式 3 至公式 6。

一级模型(FO)[45]:$I_{it}=S_0\exp\{-kt[\exp(ki)-1]\}$;　　(3)

零级模型(ZO)[46]:$I_{it}=ki$;　　(4)

连续一级(CF)[46]:

$I_{it}=S_0\{\exp[-k(t-i)]\}[k(t-i)+1-S_0[\exp(-kt)](kt+1)$;　　(5)

Gompertz 模型(GO)[47]:

$I_{it}=S_0\exp\{h[1-\exp(kt-ki)]\}-S_0\exp[1-\exp(kt)]$;　　(6)

Pirela 和 Tabatabai[21],Ghani[11]等同时利用以下的方法(公式 7- 公式 8)来计算土壤有机硫矿化速率和潜性矿化硫:

指数方程(EX):$S_e=S_0[1-\exp(-kt)]$;　　(7)

双倒数作图法(RP):$1/S_e=1/S_0+k_t/S_0\cdot 1/t$　　(8)

式中:I_{it} 为时间间隔为 i 时,经过 t 时间后所矿化的硫量;S_0 为潜性矿化硫;k 为矿化速率系数;h 为比例常数;S_e 为累积矿化量;K_t 为常数,代表矿化 50% S_0 所用的时间。

土壤硫的矿化过程中,潜性矿化硫(S_0)和硫矿化速率(k)是硫在环境中循环的重要参数[21]。S_0 是一定的条件下,矿化时间足够长时,土壤中的有机硫被矿化转变为无机硫的最大值,它表达了该土壤有机硫被矿化、供应

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

植物吸收利用的能力，可以作为表征土壤供硫潜力大小的特征值使用；硫的矿化量随时间增加的速度取决于 k 值大小，在其他条件相同时，k 值越大表明同一时间内有机硫矿化为无机硫的量越多，因此它可以作为土壤有机硫矿化的强度指标。

零级模型（ZO）能够较好的描述初始矿化硫的释放；一级模型（FO）和连续一级（CF）适合应用于中长期矿化试验；当试验淋洗间隔时间内矿化出的硫速率慢于硫的释放速率时，用 Gompertz 模型（GO）能更精确的拟合结果[46]。但各模型仍需根据得到的数据具体特点来应用。

在建立土壤硫矿化的动力学方程对实验数据进行拟合分析的基础上，国内外学者对硫的矿化进行了广泛的研究。Eller 和 Bettany[46]对不同的土壤硫矿化的动力模型进行了大量的比较，总结得出一般用的动力模型很难描述所有土壤硫的矿化类型。如一些学者发现开放培养系统 的释放和培养时间是呈线性的[11,19,33]，然而另外一些学者的研究中土壤硫的矿化速率随培养时间不断变小，硫累积矿化量与时间的关系为逐渐变得平缓的凸形曲线[20,21,46]。此外，还有一些人在同一组研究中，发现硫矿化随时间呈线性和曲线变化皆有的情况[14,21]。胡正义等认为土壤有机硫累积矿化量与矿化持续时间均符合不同关系可能有以下几种原因[31]：第一、矿化时间不一样。时间太短可能呈线性关系。第二、试验前土壤是否进行预培养。虽然试验前将供试土壤进行预培养可有利于土壤微生物稳定，但 14 d 预培养会导致相当量有机硫被矿化而使试验结果失真。第三、所用淋洗液成分不同。利用开放培养系统研究有机硫矿化动力学时，由于土壤对 SO_4^{2-} 吸附能力远大 SO_4^{2-} 和 Cl^-，因此很难保证每次矿化出 都能被 溶液淋洗出来。此外，Eller 和 Bettany 提出一些基底的生物化学过程和微生物的生物过程可能是偏离土壤硫矿化动力方程的原因[46]。Ghani 等在研究中应用指数方程和双倒数作图法计算潜性矿化硫时，获得了一些负值，并且在研究基础上推断长时间内硫矿化速率是常数的结果只是特例而不是规律[11]，因此利用指数方程和双倒数作图法计算土壤的潜性矿化硫和长期矿化速率的正确性值得探讨。

3 土壤硫矿化的影响因素

土壤硫的矿化主要取决于土壤的化学性质和生物学特性，而物理性质对硫的矿化影响甚微[11]。硫在土壤中的矿化主要是通过生物学和生物化学两种途径 [7]，所以影响微生物以及酶活性的变量提供了 释放潜力的粗略导向。然而关于土壤性质对硫矿化影响的研究是有限且富有争议的[5]。

3.1 营养元素及其比例对硫矿化的影响

关于营养元素及其比例对硫矿化的影响的研究结果并不一致。土壤中有机质的 C:S 比能大概判断硫矿化和固定的发生[48]。当 C:S 比低于 200:1 时，硫的矿化发生；硫的固定发生在 C:S 比大于 400:1；当 C:S 比介于 200:1 与 400:1 之间时，硫的矿化和固定两种情况皆有可能。Kowalenko 和 Lowe 研究发现在 C/N/S 比值较小条件下，硫的矿化量显著提高 [49]；与以上结果不同，Williams 研究表明澳大利亚 17 种土壤硫的矿化量与 C/S，N/S，C/N 的比例都无密切关系 [16]；Riffaldi 在分别对意大利和澳大利亚土壤的研究中发现硫的矿化与初始 C，N，S 的比例关系并不显著，但同有机 C，N，S 的含量密切相关[5]；然而在 Tabatabai 和 Al-Khafaji 以及 Pirela 和 Tabatabai 的研究中 C，N，S 的量与硫的矿化无关[19, 21]。

3.2 有机物的添加对硫矿化的影响

在土壤中加入有机物对硫矿化的影响取决于其 C:S 比和添加物的类型[50]。当土壤添加物含有丰富的有机硫时会发生硫的净矿化，但如果在土壤中添加低硫有机物，则会导致硫的净固定[4]。Reddy 等研究发现，在砂姜黑土中，当加入的有机物料的 C:S 比为 290:1 时达到了硫矿化和固定的临界点，高于此值硫开始固定，低于此值硫开始矿化；而黄潮土硫矿化或固定临界点的 C:S 比则是 349:1[32]。另外，在利用开放系统培养法来预测添加有机物后土壤硫的矿化时，潜性矿化硫、矿化速率随着加入土壤中有机物类型的不同变化很大[32,34,51]。

3.3 研究方法对硫矿化的影响

不同的研究方法对硫矿化的过程和矿化量的影响较大。在比较开放系统和封闭系统研究方法的试验中，发现在开放系统中前两个星期矿化硫释放最快，随后变得缓慢近乎呈线性，而在密闭系统中硫的释放则一直呈曲线规律；在短期试验中封闭系统释放的硫相近或高于开放系统，长期试验中开放系统硫的矿化量则多于封闭系统；预培养对开放系统硫的矿化量无明显影响，但却对封闭系统影响较大[52]。

对开放系统和有植物以及无植物的盆栽培养系统的试验进行比较表明：在开放系统中初期硫大量矿化释放，随后变得平缓；而在两个盆栽培养系统则与此相反，初期硫矿化量小，之后随时间而增大；另外，盆栽培养系统硫的矿化总量均小于开放系统[29]。

3.4 微生物和酶对硫矿化的影响

土壤中含有不同的硫杆菌属微生物，均能充分利用硫化合物进行自养 [4]，它们是硫矿化的直接诱因。Tabatabai 和 Chae 在培养 5 种丹麦土壤的实验中，发

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

现 释放速率和同以 ATP 为指标的微生物活性显著相关[51]。Riffaldi 等[5]比较不同土壤中相对取值范围的 k 值后认为微生物对有机硫的新陈代谢能力不同。所以,土壤含有的微生物群落和其活性的不同可能导致了土壤有机硫矿化的差异。

酶是土壤硫矿化的催化剂。Riffaldid 等研究发现潜性矿化硫与硫酸盐水解酶、芳基硫酸酯酶、蛋白酶和脱氢酶的活性显著相关[5]。其中硫酸盐水解酶可能是酯键硫矿化的主要原因[8],土壤中低浓度的硫酸盐会诱导植物根和根际微生物增加硫酸盐水解酶的分泌,使有效硫的供给量增加[22,28,53]。

3.5　好气和淹水条件对硫矿化的影响

与淹水条件相比,好氧条件下土壤有机质、总硫和有机硫等含量能更明显的影响潜性矿化硫,从而有利于硫的矿化[27]。李书田和林葆研究发现黑土、褐土、黄棕坡和红壤四种土壤在好气和淹水下 30 ℃与 20 ℃培养时,有机硫累积矿化量之比分别为 1.85 ~ 2.23 和 1.28 ~ 1.71,证明了好气比淹水条件更有利硫的矿化[25]。然而,也有学者将好气和淹水条件下有植物存在的土壤硫矿化对比研究中发现:有水稻生长的土壤硫矿化量高于有玉米生长的土壤,原因可能为水稻根际在淹水环境下,其透气组织能够提供局部的好养环境,促进微生物的活动[15]。所以,一般来说,好气比水淹条件更有利于硫的矿化,但对于有根际透气植物如水稻,淹水条件更有利于硫的矿化。

3.6　pH 对硫矿化的影响

大部分研究表明硫的矿化与土壤 pH 相关性不显著[5,16,21,54]。但 Islam 和 Dick 在同一组研究中发现不同土壤硫矿化与 pH 既呈正相关,也呈负相关关系[34]。Ghani 等研究表明 pH 与矿化硫关于有机碳的偏相关是不显著的,据此他认为硫的矿化与土壤 pH 的相关的结果是不准确的[11]。因此,关于 pH 对硫矿化的影响还有待深入研究。

3.7　其它影响因素

土壤的干燥再湿润过程能够提高硫的矿化量[12,16],一般认为是干湿交替过程加速了土壤有机化合物的分解或者微生物细胞的溶解,这一现象也是在开放培养系统进行预培养的主要依据。此外,一定阈值范围内,温度、湿度和碳酸钙能够促进土壤硫的矿化,而甲醛和甲苯则会抑制矿化硫的释放[16]。

4　建议与展望

半个多世纪以来,科研工作者对土壤中有机硫的矿化做了大量的研究,提出了多种常用的研究方法和方程模型,探究了典型土壤中硫的矿化特性和规律,并取得了丰硕的成果,然而鉴于土壤硫矿化过程的复杂性和影响因素的多样性,仍有一些问题尚不清晰,需要进一步深入研究。

⑴　目前硫矿化研究主要集中在农业和牧业土壤中,而对自然生态系统如森林和湿地的土壤研究较少,且关于试验培养方法和方程模型在其他土壤系统中推广应用的有效性应加以验证。

⑵ 封闭培养系统法、开放培养系统法和盆栽培养系统法是研究土壤硫矿化的主要方法,同一种土壤硫的矿化因采用的研究方法不同而结果差异较大。现行只有少量的研究比较了这 3 种方法对硫矿化的影响,而实际情况中各自方法的适用性值得深入探讨。

⑶ 对土壤有机硫矿化影响因素的研究,目前不同学者之间所持观点不同。可能是因为影响硫矿化因素具有关联性和复杂性,各因素之间交互作用对结果影响较大,因此在未来研究中更应关注联合作用对硫矿化的影响。此外,酶和微生物是影响硫矿化的直接因素,而过去大多数研究只注重各非生物因素对硫矿化结果的间接影响,未考虑对微生物的直接影响,不利于对影响硫矿化机理的探讨,因此这方面的研究应加强。

⑷ 现有的硫矿化动力方程模型有其局限性,应用已有的动力模型很难精确描述所有类型土壤硫的矿化,且存在较大争议,未来研究应注重对硫矿化方程模型的改进和发展。

参考文献:

[1] LINDSAY W L. Chemical equilibria in soils [M]. New York; The Wiley Press, 1979.

[2] R ENEY J. Some observations on the nature of organic sulphur compounds in soil[J]. Crop and Pasture Science, 1961, 12(3): 424 —432.

[3] BOLAN N, SYERS J, TILLMAN R. Ionic strength effects on surface charge and adsorption of phosphate and sulphate by soils [J]. Journal of Soil Science, 1986, 37(3): 379 —388.

[4] SCHERER H. Sulphur in crop production-nvited paper[J]. European Journal of Agronomy, 2001, 14(2): 81—111.

[5] RIFFALDI R, SAVIOZZI A, CARDELLI R, et al. Sulphur mineralization kinetics as influenced by soil properties[J]. Biology and Fertility of Soils, 2006, 43(2): 209—214.

[6] DICK R, CASTELLANO S. Cropping and sulfur fertilization influence on sulfur transformations in soil [J]. Soil Science Society of America Journal, 1991, 55(1): 114—121.

[7] MCGILL W, COLE C. Comparative aspects of cycling of organic C, N, S and p through soil organic matter[J]. Geoderma, 1981, 26(4): 267—286.

[8] FITZGERALD J W. Naturally occurring organosulfur compounds in soil[J]. Sulfur in the Environment, 1978, 2: 391—443.

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[9] ERIKSEN J, MURPHY M, SCHNUG E. The soil sulphur cycle[J]. Nutrients Ecosystems , 1998, 2: 39－74.

[10] MCLAREN R, KEER J, SWIFT R. Sulphur transformations in soils using sulphur-35 labelling [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1985, 17(1): 73－ 79.

[11] GHANI A, MCLAREN R G, SWIFT R S. Sulfur mineralization in some new-zealand soils[J]. Biology and Fertility of Soils, 1991, 11(1): 68－74.

[12] FRENEY J, MELVILLE G, WILLIAMS C. Soil organic matter fractions as sources of plant-available sulphur [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1975, 7(3): 217－221.

[13] MCLAREN R, SWIFT R. Changes in soil organic sulphur fractions due to the long term cultivation of soils [J]. Journal of Soil Science, 1977, 28(3): 445 －453.

[14] ZHOU W, HE P, LI S, et al. Mineralization of organic sulfur in paddy soils under flooded conditions and its availability to plants[J]. Geoderma, 2005, 125(1): 85－93.

[15] LI S T, LIN B, ZHOU W. Soil organic sulfur mineralization in the presence of growing plants under aerobic or waterlogged conditions[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(6): 721－727.

[16] WILLIAMS C. Some factors affecting the mineralization of organic sulphur in soils[J]. Plant and Soil, 1967, 26(2): 205－223.

[17] KOWALENKO C, LOWE L. Evaluation of several extraction methods and of a closed incubation method for soil sulfur mineralization[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1975, 55(1): 1－8.

[18] 李新华, 刘景双. 三江平原小叶章湿地土壤有机硫矿化特征[J]. 农业系统科学与综合研究, 2007, 23(1): 86－88, 94.

[19] TABATABAI M, AL-KHAFAJI A. Comparison of nitrogen and sulfur mineralization in soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 1000－1006.

[20] MAYNARD D, STEWART J, BETTANY J. Sulfur and nitrogen mineralization in soils compared using two incubation techniques[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1983, 15(3): 251－256.

[21] PIRELA H, TABATABAI M. Sulfur mineralization rates and potentials of soils[J]. Biology and Fertility of Soils, 1988, 6(1): 26－32.

[22] MAYNARD D, STEWART J, BETTANY J. The effects of plants on soil sulfur transformations[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1985, 17 (2): 127－ 134.

[23] HAYNES R, WILLIAMS P. Accumulation of soil organic matter and the forms, mineralization potential and plant-availability of accumulated organic sulphur: Effects of pasture improvement and intensive cultivation [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1992, 24(3): 209－217.

[24] ZHOU W, LI S, WANG H, et al. Mineralization of organic sulfur and its importance as a reservoir of plant-available sulfur in upland soils of north china [J]. Biology and Fertility of Soils, 1999, 30 (3): 245－250.

[25] 李书田, 林 葆. 土壤有机硫矿化动力学特征及影响因素[J]. 土壤学报, 2001, 38(2): 184－192.

[26] 迟凤琴, 张玉龙, 汪景宽, 等. 东北黑土有机硫矿化动力学特征及其影响因素[J]. 土壤学报, 2008, 45(2): 288－295.

[27] 李新华, 刘景双, 朱振林, 等. 三江平原小叶章湿地土壤有机硫矿化特征研究[J]. 山东农业科学, 2008, (9): 42－45.

[28] SUJI T, GOH K. Evaluation of soil sulphur fractions as sources of plant-available sulphur using radioactive sulphur [J]. New Zealand Journal of Agricultural Research, 1979, 22(4): 595－602.

[29] AMIDI J, GOH K, MCLAREN R. Comparison of three different methods of determining soil sulphur mineralization in relation to plant sulphur availability in soils[J]. Biology and Fertility of Soils, 2001, 34 (3): 131－139.

[30] BOYE K, NILSSON S I, ERIKSEN J. Net sulfur mineralization potential in swedish arable soils in relation to long-term treatment history and soil properties [J]. Biology and Fertility of Soils, 2009, 45 (7): 743－751.

[31] 胡正义, 曹志洪. 中国南方地区典型土壤有机硫矿化速率及供硫潜力研究[J]. 安徽农业大学学报, 2000, 32(6): 138－143.

[32] REDDY K S, SINGH M, SWARUP A, et al. Sulfur mineralization in two soils amended with organic manures, crop residues, and green manures [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung Und Bodenkunde, 2002, 165(2): 167－171.

[33] NGUYEN M L, GOH K M. Sulfur mineralization and release of soluble organic sulfur from camp and noncamp soils of grazed pastures receiving long-term superphosphate applications[J]. Biology and Fertility of Soils, 1992, 14(4): 272－279.

[34] ISLAM M, DICK R. Effect of organic residue amendment on mineralization of sulfur in flooded rice soils under laboratory conditions 1 [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1998, 29(7-8): 955－969.

[35] BETTANY J, STEWART J, HALSTEAD E. Sulfur fractions and carbon, nitrogen, and sulfur relationships in grassland, forest, and associated transitional soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1973, 37(6): 915 －918.

[36] NEPTUNE A, TABATABAI M, HANWAY J. Sulfur fractions and carbon-nitrogen-phosphorus-sulfur relationships in some brazilian and iowa soils [J]. Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1975, 31: 605－619.

[37] NOR Y, TABATABAI M. Extraction and colorimetric determination of thiosulfate and tetrathionate in soils[J]. Soil Science, 1976, 122(3): 171－178.

[38] NOR Y M, TABATABAI M. Oxidation of elemental sulfur in soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1977, 41(4): 736－741.

[39] ABATABAI M, BREMNER J. Distribution of total and available sulfur in selected soils and soil profiles [J]. Agronomy Journal, 1972, 64(1): 40－44.

[40] JOHNSON D, HENDERSON G. Sulfate adsorption and sulfur fractions in a highly weathered soil under a mixed deciduous forest[J]. Soil Science, 1979, 128(1): 34－40.

[41] SMITH S. Soluble organic nitrogen losses associated with recovery of mineralized nitrogen [J]. Soil Science Society of America Journal, 1987, 51(5): 1191－1194.

[42] MITH J L, SCHNABEL R R, MCNEAL B, et al. Potential errors in the first-order model for estimating soil nitrogen mineralization potentials [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 996－1000.

[43] BEAUCHAMP E, REYNOLDS W, BRASCHE-VILLENEUVE D, et al. Nitrogen mineralization kinetics with different soil pretreatments and cropping histories [J]. Soil Science Society of America Journal,

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1986, 50(6): 1478— 1483.

[44] SCHOENAU J, QIAN P, HUANG W. Assessing sulphur availability in soil using ion exchange membranes [J]. Sulphur inAgriculture, 1993, 17: 13— 17.

[45] STANFORD G, SMITH S. Nitrogen mineralization potentials of soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1972, 36(3): 465—472.

[46] ELLERT B, BETTANY J. Comparison of kinetic models for describing net sulfur and nitrogen mineralization [J]. Soil Science Society of America Journal, 1988, 52(6): 1692—1702.

[47] ELLERT B, BETTANY J. Temperature dependence of net nitrogen and sulfur mineralization [J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(4): 1133—1141.

[48] ARROW N. A comparison of the mineralization of sulfur from soil organic matter[J]. Austr J Agric Res, 1960, 11: 960—969.

[49] KOWALENKO C, LOWE L. Mineralization of sulfur from four soils and its relationship to soil carbon, nitrogen and phosphorus [J]. Canadian Journal of Soil Science, 1975, 55(1): 9—14.

[50] NIKNAHAD-GHARMAKHER H, PIUTTI S, MACHET J M, et al. Mineralization-immobilization of sulphur in a soil during decomposition of plant residues of varied chemical composition and s content[J]. Plant and Soil, 2012, 360(1—2): 391—404.

[51] CHAE Y, TABATABAI M. Mineralization of sulfur in soils amended with organic wastes[J]. Journal of Environmental Quality, 1991, 20(3): 684—690.

[52] TAN Z, MCLAREN R G, CAMERON K C. Comparison of sulfur mineralization in open and closed incubation systems and from field moist and conditioned soils [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1994, 25(19-20): 3191—3198.

[53] SPEIR T, PANSIER E A, CAIRNS A. A comparison of sulphatase, urease and protease activities in planted and in fallow soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1980, 12(3): 281—291.

[54] KARYOTIS T, MITSIMPONAS T, TZIOUVALEKAS M, et al. Net nitrogen and sulfur mineralization in mountainous soils amended with indigenous plant residues [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2006, 37(15—20): 2805—2817.

Advances on Organic Sulphur Mineralization of Soil

CHU Lei [1,2], JU Bao-yu [1*], GUAN Bo[1]

(1. *Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research(YIC), Chinese Academy of Sciences(CAS); Shandong Provincial Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes, YICCAS, Yantai Shandong* 264003, *China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: With complex proc esses and diversiform influencing factors, sulphur mineralization is one of the key processes of sulphur biogeochemical cycle. Choices of culture systems and equation models are very important for the accuracy of sulphur mineralization simulation in experiment. This paper summarized three kinds of culture systems and six kinetic models applied in sulphur mineralization from the recent research actuality. It also expounded that direct effects of microorganism and enzyme, indirect effects of soil physical and chemical properties on sulphur mineralization, and interaction of the influencing factors. The projects of this paper are to understand the characteristics, law, mechanism, study methods and kinetic models of research status of sulphur mineralization, and to explore the effectiveness and applicability of kinetic models and interactions of the influencing factors

Key words: Organic sulphur of soils; Mineralization process; Dynamic model; Influencing factor

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net