三江平原小叶章湿地生态系统硫的生物地球化学循环

李新华[1,2], 刘景双[1,*], 孙志高[1,2], 杨继松[1,2]

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130012; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 以三江平原小叶章湿地生态系统为研究对象, 应用分室模型研究了硫在大气-土壤-植物系统各分室中的分布及循环过程。结果表明, 在植物-土壤系统内, 土壤是主要的贮存库和流通介质, 有 97.78% 的硫贮存在土壤中, 且主要以有机硫的形态存在, 2.22% 的硫贮存在植物中。在植物亚系统中, 根是主要的贮库, 79.60% 的硫贮存在根中。湿地植物地上部分吸收的总 S 量为 0.75 g S/m^2; 向地下再转移的总 S 量为 0.24 g S/m^2, 向枯落物 S 库转移的总 S 量为 0.51 g S/m^2; 根吸收的总 S 量为 3.76 g S/m^2; 根向土壤 S 库转移的总 S 量为 3.07 g S/m^2; 现存枯落物中的总 S 量为 0.75 g S/m^2; 枯落物向土壤 S 库的转移量最低为 0.52 g S/m^2 · a。输入和输出过程的研究表明, 小叶章湿地生态系统在生长季 (6 ~ 9 月份) 向大气排放 H_2S 的量为 1.42 mg S/m^2, 从大气吸收 COS 的量为 1.83 mg S/m^2; 通过大气降水输入到生态系统中的硫为 4.85 mg S/m^2, 其差值为 5.26 mg S/m^2, 这表明硫在小叶章湿地生态系统中处于累积状态, 湿地存在潜在的酸化趋势。

关键词: 三江平原; 小叶章湿地; 生态系统; 硫; 生物地球化学循环

文章编号: 1000-0933 (2007) 06-2199-09 **中图分类号**: Q142, Q948.1 **文献标识码**: A

The Biogeochemical cycle of sulfur in *Calamagrostis angustifolia* wetland ecosystem in the sanjiang Plain

LI Xin-Hua[1,2], LIU Jing-Shuang[1,*], SUN Zhi-Gao[1,2], YANG Ji-Song[1,2]

1 *Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, CAS. Changchun* 130012, *China*

2 *Graduate School of CAS, Beijing* 100039, *China*

***Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 (6): 2199 ~ 2207.**

Abstract: Using the compartment model, the sulfur distribution and cycle in each compartment of atmosphere-plant-soil system were studied in *Calamagrostis angustifolia* wetland ecosystem in the Sanjiang Plain. The results showed that the soil was the main storage and current hinge of sulfur in which 97.78% sulfur was accumulated, while only 2.22% sulfur in the plant. In the plant subsystem, the root was the main storage of sulfur and it remained 79.60% of the total sulfur. Sulfur turnover in the *Calamagrostis angustifolia* wetland ecosystem showed that the aboveground parts took up 0.75 g S/m^2 and the re-translocation amounts to the root were 0.24 g S/m^2, and to the litter were 0.51 g S/m^2; the root took up 3.76 g S/m^2 and the translocation amounts to the soil were 3.07 g S/m^2; the amounts of sulfur in the litter were 0.75 g S/m^2 a and the translocation amounts to the soil were more than 0.52 g S/m^2 a. The emission amounts of H_2S from the *Calamagrostis angustifolia* wetland ecosystem to the atmosphere were 1.42 mg S/m^2, while COS was absorbed by the *Calamagrostis angustifolia* wetland from the atmosphere and absorption amounts were 1.83 mg S/m^2; the input amounts of

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (90211003); 中国科学院知识创新工程重要方向资助项目 (KZCX3-SW-332)

收稿日期: 2006-05-17; **修订日期**: 2006-11-28

作者简介: 李新华 (979 ~), 女, 山东曹县人, 博士生, 主要从事环境生态与生物地球化学研究. E-mail: xhli@neigae.ac.cn

* **通讯作者** Corresponding author. E-mail: liujingshuang@neigae.ac.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 90211003); The Key Knowledge Innovation Project in the Environmental and Resources Field, Chinese Academy of Sciences (No. KACX3-SW-332)

Received date: 2006-05-17; **Accepted date**: 2006-11-28

Biography: LI Xin-Hua, Ph. D. candidate, mainly engaged in environmental ecology and biogeochemistry. E-mail: xhli@neigae.ac.cn

sulfur from the rain to the ecosystem were 4.85mg S/m^2 during the growing season. The difference between input and output amounts were 5.26 mg S/m^2, which indicated that sulfur was accumulated in ecosystem and would lead to the wetland acidification in the future.

Key Words: Sanjiang Plain; *Calamagrostis angustifolia* wetland; ecosystem; sulfur; biogeochemical cycle

湿地是地球上具有多种功能的独特生态系统,湿地生态系统的营养元素循环研究是现代湿地生态学研究的热点[1],硫作为继氮磷钾之后的第4位重要营养元素,在植物生长发育过程中具有重要的作用,如参与蛋白质、氨基酸的合成、光合作用、呼吸作用等;同时对维持生态系统的健康发展也有着重要的意义,作为生产初级产物的植物系统,缺硫会导致代谢紊乱、生长发育受阻乃至死亡。硫的生物地球化学过程在湿地生态系统中起着重要作用,是与碳矿化、水体酸化、黄铁矿的形成,金属元素循环以及大气硫释放等一系列重要生态过程联系在一起的[2~5],因此受到了广泛的关注[6~9],而国内对湿地硫循环的研究还比较缺乏,仅张汝果报道了红树林生态系统硫的累积和循环,但其只研究了硫在土壤-植物系统内的小循环[10]。三江平原是我国淡水湿地面积最大、类型最齐全的地区之一,在本区湿地植被中,沼泽化草甸和沼泽是主要的植被类型,而沼泽化草甸又以小叶章群系最为普遍,占湿地面积的34.45%,小叶章群落处于水分交错带上[11],氧化还原条件变化强烈,氧化还原条件的改变影响硫的存在形态,进而影响硫的转化和其它元素的转化过程。但是到目前为止,有关硫循环的研究还很薄弱,仅郝庆菊等报道了总硫、各形态无机硫的分布特征[12]。为了丰富和完善三江平原湿地系统硫循环的研究内容,本文以小叶章湿地生态系统为研究对象,探讨硫在该系统中的分配、积累、转化、归还等特征和规律,阐明硫在该生态系统中所起的作用,为湿地合理利用、开发与保护提供基础依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域

研究区位于黑龙江省建三江管局洪河农场内(E133°31′,N47°35′),观测点选择在洪河农场的三区实验场进行,该地属温带大陆性季风气候,冬季严寒漫长,夏季温暖湿润,年平均气温1.9℃,≥10℃的年有效积温为2300℃左右,年降水量为600mm左右,年内降水分配不均,60%以上集中在6~9月份。试验场内的地貌类型为三江平原沼泽发育最为普遍的碟形洼地,主要植被类型有小叶章(*Calamagrostis angustifolia*)、乌拉苔草(*Carex. meyeriana*)、毛果苔草(*Carex. lasiocarpa*)和漂筏苔草(*Carex. pseudocuraica*)。上述植物群落依次处于洼地的无淹水区、季节性淹水区(-8~5cm)、常年淹水区(0~10cm)和常年淹水区(7~25cm)。土壤类型依次为草甸沼泽土、腐殖质沼泽土和泥炭沼泽土。

1.2 研究方法

植物样品的采集及计算:立枯物、地上及各器官生物量的测定采用收获法。样方面积为50cm×50cm;地下生物量采用挖掘法,取样与地上生物量采样同步进行,取样深度为50cm;以上生物量的测定均设3个重复;枯落物分解采用分解袋法,分解袋由孔径为0.5mm的尼龙网制成,规格为20cm×20cm。

根据Li等[3]的研究,植物各分室的总硫量为(S_n):

$$S_n = C_n B_n \quad (1)$$

式中,C_n为第n个分室的S含量;B_n为第n个分室的生物量。

硫在各分室间的流通量为(F_a):

$$F_a = C_a B_a \quad (2)$$

式中,C_a为地上生物量最高时的硫浓度;B_a为地上最高生物量。

地上植物体枯死后存留的总硫量为(F_{da}):

$$F_{da} = C_d B_a \quad (3)$$

式中,C_d为地上部枯死后植物的硫浓度;B_a为地上枯死植物量。

S从植物地上部分向地下部分的再转移量为(F_{rt}):

$$F_{rt} = F_a - F_{da} \quad (4)$$

经由植物根系吸收的总硫量为(F_r):

$$F_r = F_a - F_{rt} + \Delta N_u \quad (5)$$

式中,F_a和F_{rt}同上;ΔN_u为地下生物量在生长季内S的净增量。

枯落物向土壤有机硫和无机硫的转移量为(F_s):　$F_s = F_l - F_y$　(6)

式中,F_l由两部分组成,即 Fda 和 Fp,Fda 同上;Fp 代表枯落物未分解部分的总 S 量;Fy 为枯落物分解后的总硫量(本文为分解 480 d 后的总硫量)。

根系向土壤有机硫和无机硫转移量为(F_T):　$F_T = T \cdot B_{max} \cdot C_{max}$　(7)

T 为根系的周转值,其计算采用 Dahlman 等[4]的公式计算:　$T = P_m / B_{max}$　(8)

式中,P_m为根年际最高生物量与最低生物量之差;B_{max}为根系最高生物量;C_{max}为根系最高生物量时的 S 含量。枯落物分解采用尼龙袋法,枯落物的现存量及失重率[4]采用下式计算:

$$Xst = x / (1 - e^{-k}) \quad (9)$$

$$R = [(W_1 - W_2)/W_1] \times 100\% \quad (10)$$

Xst 为系统枯落物的稳定值;e^{-k}为枯落物剩余率;R 为失重率;W_1为 t_1时刻枯落物重量;W_2为 t_2时刻枯落物重量。

土壤样品的采集及计算:土壤样品的采集采用 NZ 型泥炭钻进行采样,以防止各层之间的干扰。样品采集后放入自封袋中,密封以防止样品的污染。在生长季每月采集 0~60cm 的土壤,0~20cm 土壤的采集为每 10cm 为 1 层,20~60cm 土壤的采集 20cm 为 1 层,同时测定土壤容重,每次 3 个重复。土壤基本理化性质见表 1。各形态硫在土壤中的贮量(Sn)采用下式计算[6]:

$$Sn = Cn \times V \times Sv \quad (11)$$

式中,Sn 为各形态硫在土壤中贮量,Cn 为各形态硫的含量,V 是采集土壤的体积,Sv 是土壤容重。

表 1　供试土壤的基本理化性质(0~20cm)

Table 1　Properties of soil tested

土壤层 Soil layer	有机质 Organic matter (%)	总硫 Total sulfur (mg/kg)	总氮 Total nitrogen (mg/kg)	孔隙度 Porosity (%)	pH
0~20cm	24.41	1112.97	9540.32	85.41	5.57

湿沉降量的采集及计算　大气降水采用原位收集法,硫沉降量采用下式计算[7]:

$$硫沉降量(g\ S \cdot m^{-2}) = \sum [Ci \times 10^{-6} \times Vi)/A] \times 1000 \quad (12)$$

式中,C_i为浓度($mg \cdot L^{-1}$);V_i为降水体积(L);A 为采雨器截面积(0.0314 m^2)。

气态硫化物的采集及计算:气体样品的采集采用密闭箱法[8],箱子由有机玻璃制成,规格 30cm×30cm×80cm,在每个箱子的内侧顶部装有一个小风扇,混匀箱内气体。为了不干扰采样点的土壤和植被,采样箱放在春季安装好的底座上,并在采样点周围搭建栈桥,防止采样时干扰采样点。箱子放好后,箱子下缘与底座接触处用水密封,防止漏气,立即采集第一个样品,然后每隔 20min 采集一个样品,共采集 3 个样品,每个样品采集 1L,采集的样品放在聚四氟乙烯袋里,立即带回实验室分析。

含硫气体样品的分析采用低温浓缩富集、热解吸-气相色谱法测定[9]。由于含硫气体的浓度极低,在分析前需进行浓缩富集,既将含硫气体经液氮冷凝浓缩在装有 Chromsorb G 的浓缩管中,首先通过真空泵使 800ml 气体通过浓缩管,含硫气体由于冷凝吸附作用被浓缩在装有 Chromsorb G 的浓缩管中,然后通过控温炉在 130℃下加热浓缩管 4min,解吸出来的含硫气体通过载气带进装有火焰光度(FPD)检测器的气相色谱(上海天美 7890II 型)中分析,色谱柱为:GS-GasPro 石英毛细管柱,长 30m,孔径 0.53mm,膜厚 1.5um;柱温:50℃;汽化室温度:100℃;检测器温度:220℃;载气为高纯氮气,流速:2.96ml/min;空气 A 流速:70ml/min,空气 B 流速:185ml/min;氢气流速:210ml/min。利用下面的公式计算气体的通量:$F = \frac{MPTo}{VoPo} H \frac{dc}{dt}$,式中:$F$ 为气体通量($\mu g \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$);M 为气体的摩尔质量,对 H_2S 和 COS 而言,M 分别为 34.08 和 60.07;P_0、T_0和 V_0分别为理想气体标准状态下的空气压力、气温和摩尔体积(为 1013.25hPa、273.15K 和 22.41L mol^{-1});H 为采样箱

高；P 为采样点气压；T 为采样时的绝对温度；$\frac{dc}{dt}$为采样时气体浓度随时间变化的回归曲线斜率。

2 结果与分析

2.1 小叶章植物地上、地下生物量及其硫含量季节动态

小叶章植物的地上生物量和地下生物量均具有明显的季节变化特征（图 1）。地上生物量的季节变化模式为单峰型，自 5 月植物返青后，随着水热条件的改善而逐渐增加并于 8 月中上旬达到最大值（706.71 g/m²），和马克平等的研究相一致[10]。之后，随着秋季的来临，气温降低，植物光合能力减弱，营养物质开始不断溶失与转移，生物量逐渐降低，并于生长季末（9 月下旬）达到最低值（584.31 g/m²）。小叶章植物地上各器官生物量的变化与地上总生物量的季节变化基本一致，茎、叶和叶鞘分别与 7 月底和 8 月中旬达到最大值，其最大值分别为 314.87、267.01 g/m² 和 157.45 g/m²。地下生物量的变化趋势表现为一直增加，于生长季末达到最大值，最大值为 4881.61 g/m²（图 1）。小叶章植物地上部分及各器官生物量（B_a）随植物生长天数（T）的变化均符合 $B_a = b_0 + b_1T + b_2T^2$ 的二次抛物线模型，地下生物量（B_u）均符合 $B_u = b_0/(1 + b_1e^{-kT})$ 的“S”型曲线模型（各式中的 k、b_0、b_1、b_2 均为常数），各模型的 R^2 均在 0.92 以上。

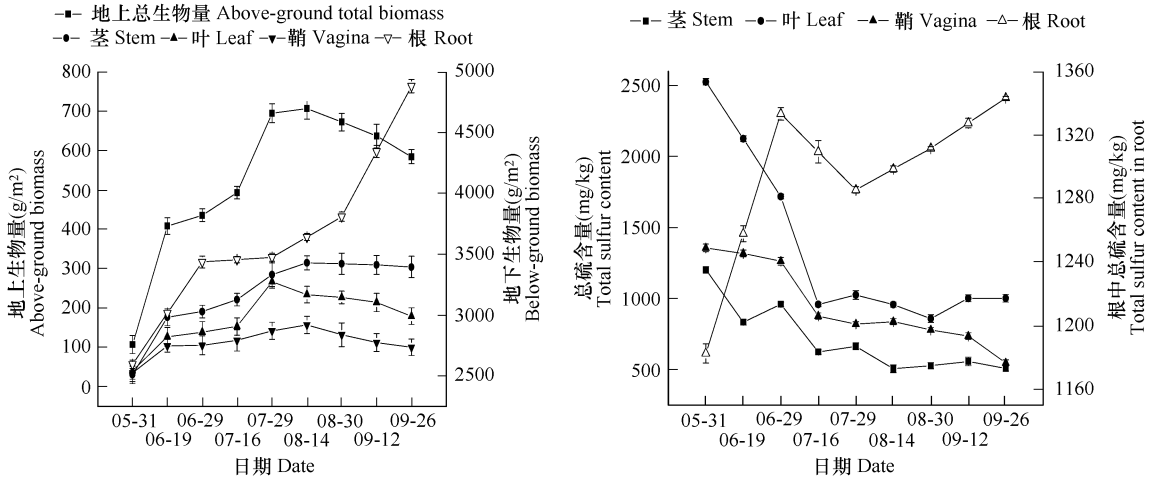

图 1 小叶章湿地植物各器官生物量及含硫量季节动态

Fig. 1 Seasonal dynamics of biomass and sulfur contents of in each part of *Calamagrostis angustifolia*

小叶章植物地上各器官（茎、叶和鞘）中总硫含量呈波动性变化，但总体上呈递减趋势。5 月末，茎、叶和鞘中的总硫含量最高，之后随时间的推移虽有一定波动但整体上单调下降，并于 9 月底达到最低值（图 1）。地上各器官中总硫含量有叶 > 鞘 > 茎。根中总硫含量呈波动变化，于 6 月末达到第一次峰值（图 1），而地上生物量达到最大值的时间为 8 月中旬（图 1），这说明根部需要提前蓄积足够的营养物质以满足地上植物生长的需要。之后，因大量的硫素转移到地上各器官中，根中总硫含量逐渐下降并于 7 月末达到最低值（285.53 ± 16.10 mg/kg）。之后，随着地上各器官的衰老以及硫素向地下的转移，根中总硫含量再次迅速增加。计算结果表明，根、茎、叶和鞘中硫的累积量分别为 3.07 ~ 6.56、0.04 ~ 0.19、0.10 ~ 0.27 g/m² 和 0.05 ~ 0.14 g/m²。地上各器官吸收和向地下再转移的总硫量分别为 0.75 g/m² 和 0.24 g/m²，而植物根部吸收的总硫量及根部向土壤硫库转移的总硫量分别为 3.76 g/m² 和 3.07 g/m²。

2.2 小叶章立枯物及其硫含量季节动态

小叶章植物在生长过程中立枯物的重量及其硫含量的变化如图 2 所示。

据图 2 可知，立枯物量在生长过程中总体上表现为生长初期最低，分别为（0.64 ± 1.47）g/m²。之后一直增加，并于生长末期达到最大值，为（640.68 ± 141.83）g/m²。与之相反，立枯物中总硫含量在生长初期最高，为（461.87 ± 105.2）mg/kg。之后其变化虽存在波动，但整体呈递减趋势。立枯物重量（L）随植物生长

天数(t)的变化符合指数增长模型,该结果和王世岩等研究的结果相符[1]。而其总硫含量的变化则符合一阶指数衰减模型,各模型的 R^2 大多在 0.94 以上。结果表明,地上活体向立枯物 S 库转移的总 S 量为 0.49g/m^2。

2.3　小叶章枯落物分解及总硫含量变化动态

小叶章枯落物的分解过程具有"快-慢"交替的变化特征(图 3),每年的 5 到 10 月是主要的分解期,分解较快,11 月到翌年的 4 月分解缓慢,这与当地的气候条件相适应,11 月到次年的 4 月,为封冻期和冻融期,气温较低,微生物活性弱,分解缓慢或停止,5 月份,气温逐渐升高,微生物活性增强,分解加快。分解 480d 后,

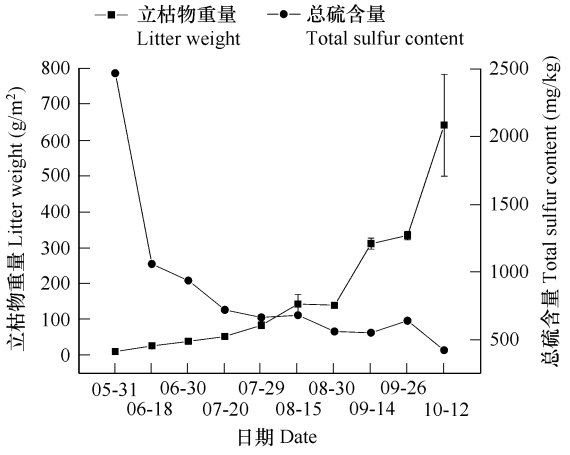

图 2　小叶章湿地立枯物重量及总硫含量的变化

Fig. 2　Changes of litter weight and total sulfur content

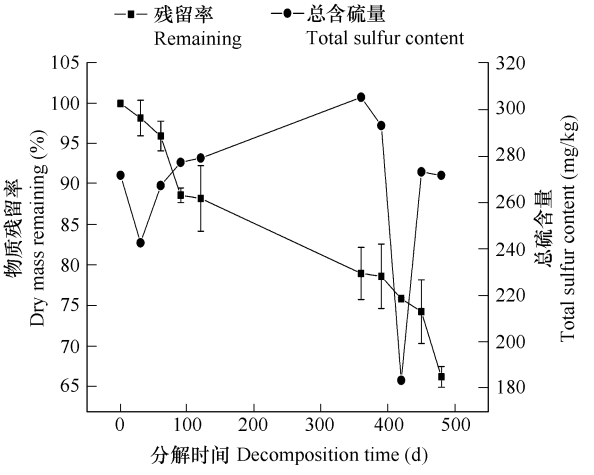

图 3　小叶章枯落物残留率及含硫量变化

Fig. 3　Changes of mass remaining of sulfur content. of *Calamagrostis angustifolia* litter

小叶章枯落物损失 33.72%。拟合结果表明,干物质残留率随分解时间的变化符合指数衰减模型(R^2 = 0.930,P < 0.0001),这与前人的研究结果相一致[2]。枯落物中的总硫含量呈波状变化,且这种变化主要受 C:S 的影响。不同分解阶段枯落物中总硫含量与初始总硫含量的比值表明,小叶章枯落物在 60d 内和 390 ~ 420d 均存在硫素损失,损失率介于 1.61% ~ 32.48% 之间,其余时间均为硫素累积过程。计算结果表明,小叶章湿地枯落物的现存量为 2.773 g/m^2,其总硫量为 0.75 g/m^2,而由枯落物分解所归还的总硫量为 0.52 g/m^2。因为随着枯落物积累年限和分解时间的增长,枯落物向土壤转移的总硫量也会增加,所以在本项研究中以 > 0.52 g/m^2 来表示向土壤硫库的归还量。

2.4　土壤总硫和无机硫的季节变化动态

生长季内,0 ~ 10cm 和 10 ~ 20cm 两层土壤中总硫含量的季节变化基本相同(图 4),均为先降低后升高而后又降低,0 ~ 20cm 厚土层是根系集中区,因此土壤总硫含量受到植物生长过程的影响,与根中总硫含量的季节变化相比较(图 1),发现土壤中总硫的变化与根中总硫的变化相异,相关分析表明 0 ~ 10cm 和 10 ~ 20cm 土壤总硫含量和根中总硫的含量存在负相关关系,相关系数分别为:r = −0.781 和 r = −0.464。5 ~ 6 月份,是小叶章植物的第一次旺盛生长期,根系需要从土壤中吸收

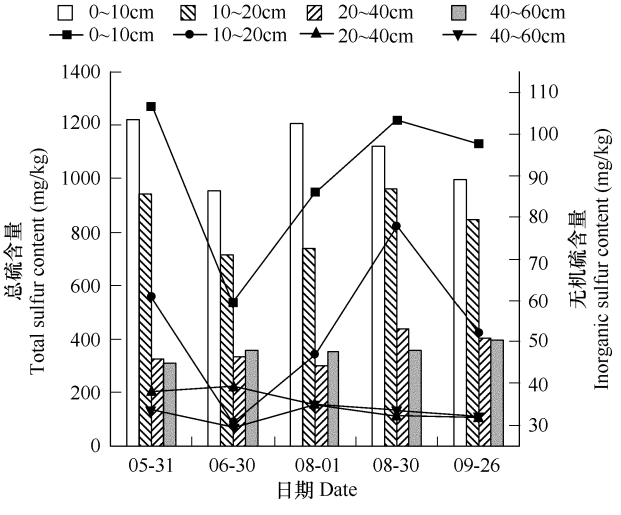

图 4　小叶章湿地土壤(0 ~ 60cm)总硫和无机硫的季节变化

Fig. 4　Seasonal changes of total sulfur and inorganic sulfur in soil (0 − 60cm) of *Calamagrostis angustifolia* wetland

大量的营养元素来满足植物生长的需要,另外 6 月末至 7 月末是小叶章植物的第二次生长高峰期,此间地上各器官对各营养元素的需求量很大,根作为营养元素的吸收和传递器官,在生长高峰到来前蓄积足够的营养以满足植物此间生长发育的需要,因此根在此期间从土壤中吸收了大量的营养元素,伴随着根中硫含量的升高,土壤中总硫含量降低。6 月末到 7 月末,土壤中总硫含量升高,这可能与这段时间温度较高,微生物活性强,对植物残体的分解能力增强,由植物残体分解引起的元素归还量增加,从而导致土壤中总硫含量升高。7 ~8 月份,0 ~10cm 土壤总硫含量降低,而 10 ~20cm 总硫含量增高,此段时间降雨较多,地表积水,淋溶作用引起表层硫的损失,致使下层总硫含量增加。8 ~9 月份,0 ~10cm 和 10 ~20cm 土壤总硫含量均降低。20 ~40cm 和 40 ~60cm 土壤层的总硫含量明显低于以上两层,且季节变化不明显。0 ~60cm 土壤各层硫含量的季节变化范围依次为:954.76 ~1121.07 mg/kg、714.73 ~944.03 mg/kg、299.29 ~437.14 mg/kg 和 310.37 ~395.84 mg/kg,上层土壤总硫含量高于下层,表明硫主要在表层富集。

无机硫可以直接被植物利用,其变化更易受到植物生长过程的影响。0 ~10cm 和 10 ~20cm 两层土壤无机硫含量具有一致的季节变化规律(图 4)。0 ~20cm 是根系集中分布区,在 5 ~6 月份植物生长旺盛,需要从土壤中吸收大量的营养元素满足自身生长的需要,由此导致无机硫含量迅速降低。6 月末到 8 月末,两层土壤无机硫含量明显增加,这可能与下列因素有关,一是枯落物残体分解释放出大量的无机硫,其次 6 ~8 月份,降水较多,由降水输入的 SO_4^{2-} 增加,再者大量的降水使地表由无积水变为积水,干湿交替变化能引起 SO_4^{2-} 的大量释放。8 月至 9 月土壤无机硫含量又都降低。20 ~40cm 和 40 ~60cm 土壤层无机硫的季节变化不明显,该层土壤中根系较少有关。0 ~60cm 土壤各层无机硫含量的季节变化范围依次为:59.56 ~106.84 mg/kg、30.65 ~77.93 mg/kg、31.96 ~39.35 mg/kg 和 29.35 ~33.69 mg/kg。由公式 11 计算得到 0 ~60cm 层土壤的总硫量介于 238.22 ~288.01 g/m^2 之间,无机硫量介于 16.17 ~25.96 g/m^2 之间,有机硫量为总硫和无机硫之差,其值介于 222.05 ~262.05 g/m^2 之间。

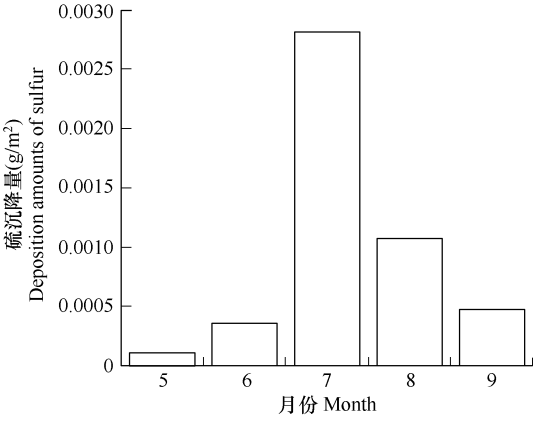

图 5 生长季硫的月沉降量变化

Fig. 5 The change of month deposition amounts of sulfur during growing season

2.5 硫的月沉降动态和沉降总量估算

大气沉降是各类生态系统获得硫素的重要途径之一。在生长季(5 ~9 月份),每月硫的湿沉降量如图 5 所示,呈先升高后降低的趋势。5、6 月份沉降量较小,这可能与该区农业施肥活动引起的氨挥发量增大有关,5、6 月份是当地水稻和大豆种植施基肥期。7 月份出现峰值可能与该区所处地理位置和风向有关,三江平原地区为温带大陆性季风气候,其生长季一般盛行东南风,而其东南方向主要为朝鲜、韩国和日本。8,9 月份沉降量又逐渐降低。估算得到生长季由降雨输入的硫为 4.85mg S/m^2。

2.6 含硫气体排放季节动态及排放量估算

小叶章湿地在生长季排放 H_2S 和 COS 的情况如图 6 所示。在观测期内,小叶章湿地排放 H_2S 的范围为:

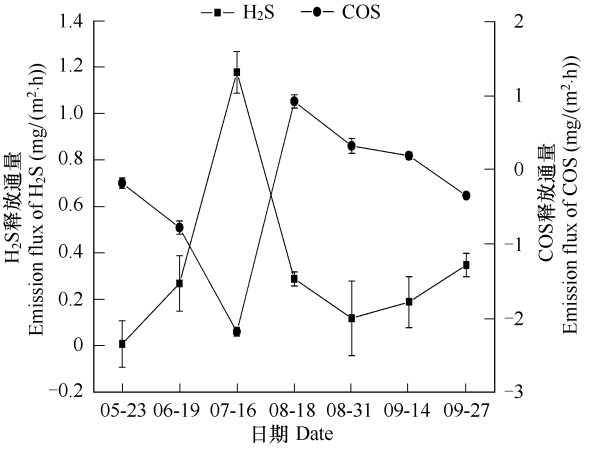

图 6 H_2S、COS 通量季节变化特征

Fig. 6 Seasonal variation of H_2S and COS emission fluxes

0.00 ~ 1.18μg S/(m²·h),平均排放强度为:0.34μg S/(m²·h),其排放模式为单峰式。在 5 ~ 7 月份,释放速率逐渐增大,在 7 月份出现峰值,峰值为 1.18μg S/(m²·h),这可能与 7 月份气温较高有关,温度高有利于土壤中微生物酶活性提高,从而引起有机质代谢速度加快,含硫气体释放量随之增加[3,24],8 ~ 9 月份,释放通量明显低于 7 月份,可能是植物日渐衰老所致。小叶章湿地排放 COS 的范围为:-2.18 ~ 0.92μg S/(m²·h);平均排放强度为:-0.29 μg S/(m²·h)。5 ~ 7 月份,COS 的释放通量逐渐减小,到 7 月份出现吸收峰,峰值为 -2.18μg S/(m²·h),这可能与植物旺盛生长有关,植物被认为是 COS 最大的汇[5],植物的生长过程对 COS 具有代谢作用[5];8 ~ 9 月份,COS 释放通量先增加后又减少,此段时间,植物处于成熟期和衰老期,其生命活动能力减弱,对 COS 释放影响减小,引起释放速率增加,但同时温度降低,引起释放速率减小,因此排放速率呈现波动。相关分析表明 COS 与 H_2S 排放量具有显著负相关性(图 6),两者的相关系数为:$r = -0.83$,$P < 0.05$,这表明在小叶章植物体内,COS 与 H_2S 存在转化关系,验证了 COS 在植物体内可被同化水解为 CO_2 和 H_2S 的结论[6]。

根据数值积分法得到生长季小叶章湿地 H_2S 的排放量为:1.42 mg S/m²,COS 的排放量为:-1.83 mg S/m²,由此得出小叶章湿地是 H_2S 的释放源,是 COS 汇的结论。

2.7　小叶章湿地生态系统硫的生物地球化学循环

硫在小叶章湿地植物-土壤系统各分室中分配的研究结果表明(表 2),土壤有机硫是小叶章湿地系统硫库的主体,其所占比例高达 89.71%;土壤无机硫所占比例相对较低,仅为 8.07%。可见土壤 S 库在生态统物质循环过程起着重要作用,是营养元素的主要贮存库和流通枢纽。而植物体硫储量所占的比例较低,为 2.22%。在植物亚系统中,根和枯落物是硫的主要储库,其硫储量分别为 4.72 和 0.75g/m²,所占比例分别为 79.60% 和 12.65%。与之相比,地上各器官特别是茎和鞘所占的比例均较低,三者硫储量之和为 0.46 g/m²,其所占比例仅其所占比例仅为 7.76%。在上述各项研究的基础上建立起小叶章湿地大气-植物-土壤系统各分室硫的分配与流通的循环模型(图 7)。根据循环模型得到小叶章湿地系统硫的输入与输出量(表 3)。最后的研究结果表明,小叶章湿地生态系统的硫输入量高于硫输出量,其差值最低为 5.26 mg S/m²(表 3),这说明小叶章湿地系统处于硫积累状态,硫虽然是植物生长必需的营养元素,但过多的积累可能会抑止植物的生长,降低生态系统的生产力,严重时可能引起湿地的酸化。因此在今后有必要借鉴国外治理酸化湿地的措施,防止酸化湿地的出现。

表 2　硫在小叶章湿地土壤-植物系统各分室中的分配(g/m²)

Table 2　Allocation of sulfur among compartments of plant-soil system of *Calamagrostis angustifolia* wetland (g/m²)

地上活体 Above-ground-living body				根 Root	枯落物 Litter	植物系统 Plant system	土壤(0 ~ 60cm) Soil (0 ~ 60cm)		土壤-植物系统 Plant-soil system
总硫 Total sulfur (g·m⁻²)	茎 Stem	叶 Leaf	鞘 Vagina				无机硫 Inorganic sulfur	有机硫 Organic sulfur	
	0.15	0.21	0.1	4.72	0.75	5.93			
比例 Proportion (%)	2.53	3.54	1.69	79.60	12.65	2.22	8.07	89.71	100

3　结论

在对植物-土壤系统内的 S 循环研究表明,土壤是主要的 S 贮存库和流通枢纽,有 97.78% 的硫贮存在土壤;另外 2.22% 的硫贮存在植物体中。在植物亚系统中,79.60% 的硫贮存在根中。湿地植物地上吸收的总 S 量为 0.75 g S/(m²·a);向地下再转移的总 S 量为 0.24 g S/(m²·a);根部吸收的总 S 量为 3.76 g S/(m²·a);根部

表 3　生长季小叶章湿地系统硫的输入和输出(mg·S/m²)

Table 3　The amounts of input and output of sulfur in *Calamagrostis angustifolia* wetland system (mg·S/m²)

输入 Input	输出 Output		差值 Deficit
降雨 Precipitation	H_2S	COS	
4.85	1.42	-1.83	5.26

向土壤 S 库转移的总 S 量为 3.07 g S/(m²·a);地上活体向枯落物 S 库转移的总 S 量 0.51 g/m²;现存枯落物的总 S 量为 0.75 g S/(m²·a);枯落物向土壤 S 库的转移量最低为 0.52 g S/(m²·a)。

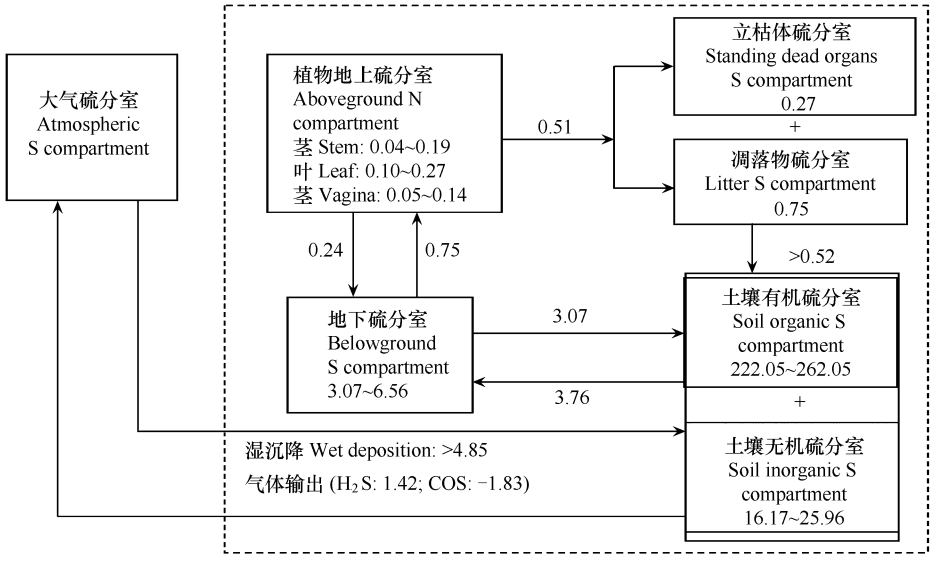

图 7 小叶章湿地生态系统硫循环模式

Fig. 7 Sulfur cycle model of *Calamagrostis angustifolia* Wetland Ecosystem

对小叶章湿地系统硫输入与输出过程的研究结果表明:在生长季通过大气降水输入的硫为 4.85mg. S/m²,以 H_2S 的形态输出量约为 1.42m S /m²;以 COS 的形态吸收量约为 1.83 mg S/m²。输入和输出的差值为 5.26 mg S /m²,这表明硫在生态系统中处于积累状态,当积累过多时可能导致湿地酸化,因此在今后应加强这方面的研究,预防酸化湿地的发生。

References:

[1] Yang Y X, Wang S Y, He T R, *et al*. Study on plant biomass and its seasonal dynamics of typical wetland ecosystem in the Sanjiang Plain. Grassland of China, 2002, 24(): 1-7.

[2] Howarth R W, Teal J M. Sulfate reduction in a New England salt marsh. Limnology & Oceangraphy, 1979, 24: 999-1013.

[3] Thamdrup B, Fossing H, Jorgensen B B. Manganese, iron and sulfur cycling in a coastal marine sediment, Aarhus Bay, Denmark. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1994, 58: 5115-5129.

[4] Nedwell D B, Watson A. CH_4 production, Oxidation and emission in a U. K. Ombrotrophic peat bog: influence of SO_4^{2-} from acid rain. Soil Biology and Biochemistry, 1995, 27: 893-903.

[5] Kevin W, Mandernack L, Lynch, *et al*. Sulfur cycling in wetland peat of the New Jersey Pinelands and its effect on stream water chemistry. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64(23), 3949-3964.

[6] Luther G W, Church T M. Seasonal cycling of sulfur and iron in porewaters of a Delaware salt marsh. Marine Chemistry, 1988, 33, 295-309.

[7] Feijtel T C, Salingar Y, Hordijk C A, *et al*. Sulfur cycling in a Dutch moorland pool under elevated atmospheric S-deposition. Water Air Soil Pollution, 1989, 44, 215-234.

[8] Spratt H G, Morgan M D. Sulfur cycling in a cedar dominated freshwater wetland. Limnology & Oceangraphy, 1990, 35, 1586-1593.

[9] Roberta A, Gianmarco G, Marco B, *et al*. Iron, sulphur and phosphorus cycling in the rhizosphere sediments of a eutrophic Ruppia cirrhosa meadow (Valle Smarlacca, Italy). Journal of Sea Research, 2001, 45: 15-26.

[10] Zhang R G. Study on sulfur accumulation and cycling in Mangrove forest in pear River mouth. Tropical and Subtropical Soil Science, 1996, 5(6): 67-73.

[11] He L ed. The Sanjiang Plain of China. Harbin: Heilongjiang Sciences Technology Press, 2000. 20-100.

[12] Hao Q J, Wang Q C, Wang Y S. The distribution of sulfur in typical wetland soils in the Sanjiang Plain. Journal of Soil Science, 2004, 35(6): 331-335.

[3] Li Y S, Redmann R E. Nitrogen budget of *Agropyron dasystachyum* in Canadian mixed prairie. the American Midland Naturalist, 1992, 128: 61 — 71.

[4] Dahlman R C, Kucera C L. Root productivity and turnover in native prairie. Ecology, 1965, 46: 84 — 89.

[5] Liu J Sh, Sun X L, Yu J B. Nitrogen content variation in litters of *Deyeuxia angustifolia* and *Carex*. *Lasiocarpa* in Sanjiang Plain. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11 (6): 898 — 902.

[6] Zhang F Z, Liang H, Zhang H L, *et al*. Biogeochemical cycling of nitrogen, phosphorus and sulphur in pinus-tabulaeformis forest ecosystem in Haihe River basin. Acta Scientiae Circumstantiae, 1991, 11 (2): 131 — 140.

[7] Li Y Z, Zhu Y C, Jiang S C. Nitrogen deposition in Leymus chinensis Grassland of Songnen Plain. Grassland of China, 2000, 2: 24 — 27.

[8] Kanda K, Minami K. Measurement of dimethyl sulfide emission from lysimeter paddy field. the Ecological Bulletin, 1992, 42, 195 — 198.

[9] Li X H, Liu J S, Jia Y Q. Determination of trace hydrogen sulfide by Cryogenic adsorption-thermal desorption gas chromatography. Journal of Instrumental Analysis, 2006, 25 (6): 68 — 69.

[10] Ma K P, Zhou R C, Zhang Y. Studies on the structure and seasonal dynamics of aboveground biomass of *Calamagrcstis Angustifolia* Grassland in Sanjiang Plain. Grassland of China, 1993, 2: 27 — 31.

[11] Wang S Y, Yang Y X. Study on Dynamics of litter and Seasonal Dynamics of Phosphorus in Decomposed of *Deyeuxia angustifolia* in Sanjiang Plain. Grassland of China, 2000, 6: 6 — 10.

[12] Olson J S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. Ecology, 1963, 44: 322 — 331.

[13] Goldan P D, Kuster W C, Albritton D L, *et al*. The measurement of natural sulfur emissions from soil and vegetation: three site in the eastern united states revisited. Journal of Atmospheric Chemistry, 1987, 5: 439 — 467.

[14] Yang Z, Wang L. Research and prospect: on the research of emission of volatile sulfur gases. Advances in Environmental Science, 1996 (4): 19 — 27.

[15] Fall R, Albritton D L, Fehsenfeld R C, *et al*. Laboratory studies of some environmental variables controlling sulfur emissions from plants. Journal of Atmospheric Chemistry, 1988, 6: 341 — 362.

[16] Brown K A, Bell J N B. Vegetation the missing sink in the Global cycle of carbonyl sulfide (COS). Atmospheric Emvoronment, 1986, 20 (5): 537 — 540.

参考文献:

[1] 杨永兴,王世岩,何太蓉,等. 三江平原典型湿地生态系统生物量及其季节动态研究. 中国草地, 2002, 24 (): 1 ~ 7.

[0] 张汝国. 珠江口红树林硫的累积和循环研究. 热带亚热带土壤科学, 1996, 5 (6): 67 ~ 73.

[1] 何 琏. 中国三江平原. 哈尔滨:黑龙江科学技术出版社, 2000, 20 ~ 100.

[2] 郝庆菊,王启超,王跃思. 三江平原典型湿地土壤硫的分布特征. 土壤通报, 2004, 35 (6): 331 ~ 335.

[5] 刘景双,孙雪利,于君宝. 三江平原小叶章、毛果苔草枯落物中氮素变化分析. 应用生态学报, 2000, 11 (6): 898 ~ 902.

[6] 张福珠,梁辉,章慧麟等. 怀柔山地油松林氮、磷、硫生物地球化学循环的研究. 环境科学学报, 1991, 11 (2): 131 ~ 140.

[7] 李玉中, 祝延成,姜世成. 羊草草地生态系统干湿沉降氮输入量的动态变化. 中国草地, 2000, 2: 24 ~ 27.

[9] 李新华, 刘景双, 贾益群. 低温吸附、热解吸气相色谱法测定痕量硫化氢. 分析测试学报, 2006, 25 (6): 68 ~ 69.

[0] 马克平,周瑞昌,张悦. 三江平原小叶章草地地上生物量组成结构与季节动态的研究. 中国草地, 1993, 2: 27 ~ 31.

[1] 王世岩,杨永兴. 三江平原小叶章枯落物分解动态及其分解残留物中磷素季节动态. 中国草地, 2000, 6: 6 ~ 10.

[4] 杨震, 王雷. 挥发性有机硫化合物释放的研究与展望. 环境科学进展, 1996 (4): 19 ~ 27.