

吴昊,王韬. 北京市交通污染区土壤-植物硫含量季节分布特征[J]. 江苏农业科学,2018,46(11):255-259.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.11.063

北京市交通污染区土壤-植物硫含量季节分布特征

吴昊¹,王韬²

(1. 河北旅游职业学院,河北承德 067000; 2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室,北京 100089)

摘要:以北京市交通污染区典型植物(乔木、灌木、草本)为研究对象,不同季节采集土壤和植物样品,测定和分析植物-土壤系统硫素分布特征和季节动态。结果表明,在生长季植物体不同器官总硫含量存在差异,均表现为根>叶>叶鞘>茎,这种分布和植物各器官的功能相一致。植物各器官总硫含量均具有季节变化特征,各器官总硫含量在生长季内均表现为先增加后降低趋势,不同季节相同器官硫含量均表现为乔木>灌木>草本,根中总硫含量明显高于植物地上部各器官总硫的含量,即根是硫的重要储库。乔木、灌木和草本土壤总硫和有效硫含量具有明显的分层性,即沿着剖面从上到下逐渐降低,在0~10 cm达到最大,相同土层均表现为乔木>灌木>草本,不同层次土壤总硫、有效硫含量均具有明显的季节变化,在夏季达到最大,之后有所降低。相关性分析表明,土壤有机碳和全氮含量与土壤-植物硫含量呈显著正相关,表明土壤有机碳和全氮是影响土壤-植被硫含量的主要因子。

关键词:交通污染区;土壤;植物;硫含量

中图分类号: X511 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)11-0255-05

生物体新陈代谢过程中需要的元素具有多样性,硫作为一种非金属元素,存在的形式具有多样化,一方面能够以含硫的气体形式存在于自然界中,可以在空气中飘散;另一方面,能够以硫酸盐的形式影响生物体的代谢过程,同时也能在非生命环境中存在^[1-2]。国内外学者通过研究发现,无论是人体还是动植物,体内的硫含量既不能过多也不能过度缺乏,否则将会影响动植物的生长发育,不利于人体健康^[3-4]。植物对硫的反应较为明显,硫含量的高低能够直接在叶片颜色及形状等方面表现出来,因此,常常利用植物中硫含量检测来了解植物对环境的反应^[5-6]。

大气中的硫污染将对植物组织的硫含量产生最直接的影响,这也是植物体内硫含量过高的最主要原因之一。硫一般通过2种方式进入植物体内:(1)叶片组织在吸收空气气体时将其中的硫吸入,进而在植物体内积累;(2)植物根系在养分吸收时不可避免地将硫离子吸入,进而积累在了植物体内。

一部分硫含量参与其新陈代谢,而其余的硫含量将以储存物质的形式停留在植物体内的多个器官^[7]。硫的产生一般有2种途径:一是自然界自身发展过程中产生的硫,如火山喷发导致大量的含硫物产生,二是人类大自然开发利用过程中产生的大量硫污染,这是硫产生的最主要途径,也是造成硫含量超标的最主要原因,人们在开矿提炼、制造硫酸过程中造成了大量的硫气体产生,另外,在经济社会生活中使用含硫燃料等导致硫产生,现在常见的汽车尾气中也产生了较多的硫含量^[8-9]。随着工业化进程的不断发 展,人为经济活动及社会生活大大加剧了硫污染,虽然煤炭这种高硫产物的能源使用量在急剧减少,但是诸如汽车尾气排放等污染导致硫含量依然远超过空气的正常硫含量,空气硫污染依然在困扰着人们,酸雨以及冬季的雾霾等都在困扰着社会生活,短期内来说,硫污染将难以消除,影响着动植物的生长,对人体呼吸系统带来较大危害^[5,10-11]。近年来,随着环境保护的日益重视,硫污染越来越得到政府和市民的重视,不仅政府在优化能源利用结构,企业也在不断改进能源使用效率,这些举措将大大有利于硫污染的降低。

城市绿植一般具有较强的耐受性,对当地的环境适应性强、存活能力强,不仅有利于吸附空气中的可悬浮颗粒及粉尘

收稿日期:2017-09-18

基金项目:河北省承德市社会发展研究课题(编号:Z20162016)。

作者简介:吴昊(1981—),女,甘肃白银人,硕士,讲师,研究方向为大气生态学。E-mail:wu_hao2006@163.com。

[11]肖振林,王果,黄瑞卿,等. 酸性土壤中有价态镉提取方法研究[J]. 农业环境科学学报,2008,27(2):795-800.

[12]张树兰,杨学云,吕殿青,等. 温度、水分及不同氮源对土壤硝化作用的影响[J]. 生态学报,2002,22(12):2147-2153.

[13]王秀衡,任南琪,王爱杰,等. 铁锰离子对硝化反应的影响效应研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2003,35(1):122-125.

[14]周相玉,冯文强,秦鱼生,等. 镁、锰、活性炭和石灰及其交互作用对小麦镉吸收的影响[J]. 生态学报,2013,33(14):4289-4296.

[15]侯秀,王祖伟. 铁锰氧化物添加对土壤镉有效态及生物效应的影响[J]. 农业环境科学学报,2009,28(11):2313-2317.

[16]Tu S H, Racz G J, Goh T B, et al. Transformations of synthetic

birnessite as affected by pH and manganese concentration [J]. Clays&Clay Minerals,1994,42(3):321-330.

[17]Koyanaka H, Koyanaka S, Liang R, et al. Manganese oxide(Mn₂O₃) as adsorbent for cadmium [J]. Journal of Japan Society on Water Environment,2000,23(2):116-121.

[18]Turner A, le Roux S M, Millward G E. Adsorption of cadmium to iron and manganese oxides during estuarine mixing [J]. Marine Chemistry,2008,108(1/2):77-84.

[19]马艳飞,王九思,宋光顺,等. 氢氧化镁对废水中镉(II)吸附性能的研究[J]. 兰州铁道学院学报(自然科学版),2003,22(4):120-122.

等,还有利于将空气中的一定硫气体进行吸收,从而降低硫污染,改善空气质量,对空气温度及湿度起着一定的调节作用^[12]。另外,城市绿植能够通过叶片等对硫含量产生一定的外在表现,因而要注重利用城市绿植的硫含量测定来了解城市绿植与硫污染间的关系^[13-14]。城镇化不断发展,城市面积不断扩大甚至占据了大量的耕地,在寸土寸金的城市,绿植作为城市绿化的重要组成部分,不仅能够增加城市美感,更能发挥净化空气的效益,绿植在光合作用的过程中将二氧化碳、硫等吸入叶片组织内,并将氧气等释放^[15]。在当前汽车尾气排放污染日益广泛的情况下,利用城市绿植来降低空气污染具有重要的现实意义^[16]。作为首都的北京,同样存在着部分区域空气污染较为严重的问题,尤其是北京汽车尾气排放量大,部分区域空气中的硫含量明显超标,已经影响到居民的生活。为了更好地探讨城市绿植与硫含量之间的关系,本试验选取了15种城市绿植来研究如何降低空气中硫含量。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验选择首都北京,横跨160 km,海拔最低处在10 m以下,高处达到1 000 m左右,因地理位置影响而属于温带半干旱季风气候^[17-18],呈现典型的四季分明,且具有时间并不短的无霜期。近年来,平均气温10℃左右,高寒山区气温较低,最高气温在7—8月,高温近40℃,呈现典型的夏季炎热多雨,全年近七成的降雨集中在7—9月,年均降水量600 mm;冬季明显干燥寒冷,受西北北风影响会出现风沙天气。以褐土、潮土为主要的土壤。

1.2 材料及方法

试验时间选择在2016年的3、6、9、11月4个月,研究对象为乔木(小叶樟 *Deyeuxia angustifolia*、云杉 *Picea asperata*、杜仲 *Eucommia ulmoides*、早柳 *Salix matsudana*、鹅掌楸 *Liriodendron chinense*)、灌木(海棠 *Malus spectabilis*、紫荆 *Cercis chinensis*、玉兰 *Magnolia denudata*、紫叶小檗 *Berberis thunbergii*、石楠 *Photinia serrulata*)及草本(堇菜 *Viola verecunda*、鸢尾 *Iris tectorum*、车前草 *Plantago depressa*、矮牵牛 *Petunia hybrida*、金盏菊 *Calendula officinalis*)等15个物种,样品的采集分别选择在18条城市道路交通污染区绿化路段,树龄基本一致,而且绿植生长的土壤类型及光照等外在生长条件基本一致,这样能够增强研究的准确性。将不同路段的同一树种中的10株植物随机选择出来,并将其叶片、叶鞘、茎及根分别进行采样,并进行土壤采样。然后从所选植物中选择成熟叶片3~5张,每株植物剪下5个枝条,要求枝条具有10~30张叶片,选择的同种植物具有相同的高度,然后将其从地面剪下带回实验室,进行各部分分类,并将枝干等附生有机物去除,后装入塑料袋。首先对叶片进行洗净,擦干,叶片及树皮样品均利用60℃的鼓风机干燥器烘干处理,最后经过仔细的研磨处理用广口瓶收纳以备检测。地下根通过挖掘法,挖掘深度达到50 cm,将根全部挖出,3次重复,将根系清洗干净后分为死根和活根,分别烘干研磨后待测。

采集土壤样品,采集时要求每隔10 cm进行1次分层并取样,取样土壤的深度达到40 cm,表层土壤采取挖掘方式采样,其他各层则在小范围内通过NZ型泥炭钻进行采样,从而

降低因空间不同而影响试验的准确性。

样品的封装利用自封袋进行,并加强防污染,这样才能保障测量的准确性。同时,均匀混合在每个点采集的3个样品,经过混合后将形成新的样品;采集的土样经过风干处理,待自然风干后去除杂物,经过仔细研磨后过100目筛,以待后续测定。具体测定方法见表1。

表1 测定项目及测定方法

测定项目	测定方法
植物全硫	HNO ₃ - HClO ₄ 消煮 BaSO ₄ 比浊法
土壤全硫	Mg(NO ₃) ₂ - BaSO ₄ 比浊法
土壤有效硫	Ca(H ₂ PO ₄) ₂ - HOAC 浸提 BaSO ₄ 比浊法
土壤有机质	K ₂ Cr ₂ O ₇ - H ₂ SO ₄ 氧化法
土壤全氮	开氏消煮法
全磷和有效磷	NaOH 碱溶 - 钼锑抗比色法
全钾和有效钾	乙酸铵浸提 - 火焰光度计法

1.3 数据处理

将相关数据测定后,采用Excel 2010进行统计整理,对方差分析及相应的统计检验利用SPSS 18.0软件进行,并进行LSD多重比较,通过单因素方差分析对研究数据差异显著性进行对比分析^[19]。

2 结果与分析

2.1 植物不同器官中硫素的分布

植物各器官不仅对不同元素具有选择吸收性,即使对同种元素也具有不同的累积能力。对比不同植物体不同器官中硫素浓度发现,硫的平均含量在不同器官中存在差异,其中根的平均含量最高,其次是叶,再者是鞘和茎(图1)。其中,不同器官硫含量均表现为乔木>灌木>草本,乔木显著高于灌木和草本,灌木和草本差异不显著。植物不同器官硫含量的差异是由相应器官的结构和功能决定的。根是主要的供硫器官,植物地上部分的硫素都来源于根,根需要富集大量的硫素才能满足植物生长的需要,因此,根中硫含量最高(图1-A)。叶是小叶樟植物生长过程中最幼嫩的器官,是新陈代谢最旺盛的部位,硫优先分配给植物最幼嫩的部位。小叶樟是多年生木本植物,其鞘和茎也能进行光合作用,故鞘和茎中的硫含量也较高。总之,植物不同器官硫含量的分布与其功能是一致的。

2.2 植物不同器官中硫含量季节变化

在生长季内,小叶樟植物体各器官因生长阶段和自身组织结构的不同,其总硫含量均有着明显的季节变化。从表2可以看出,总体上茎、叶和鞘各器官中硫含量呈波动性变化,但总体上呈先增加后降低的趋势,夏季各植物不同器官总硫含量最高,之后随时间的推移虽有一定波动,但整体单调下降,在冬季和春季较低,地上部各器官中总硫含量所表现出的波动可能与各器官生物量增加而表现出的“稀释效应”有关。若以总硫含量表示植物体地上部各器官的硫素利用状况,则硫素含量越高,利用率越低,不同器官的硫素利用率表现为茎>鞘>叶,这也从侧面反映了硫素在叶和鞘中含量高。不同季节各器官硫含量均表现为乔木>灌木>草本。根中总硫的变化与地上部各器官总硫的变化不同。根中总硫含量在生长季内表现为先增加后迅速减小趋势。夏季根中总硫的含量

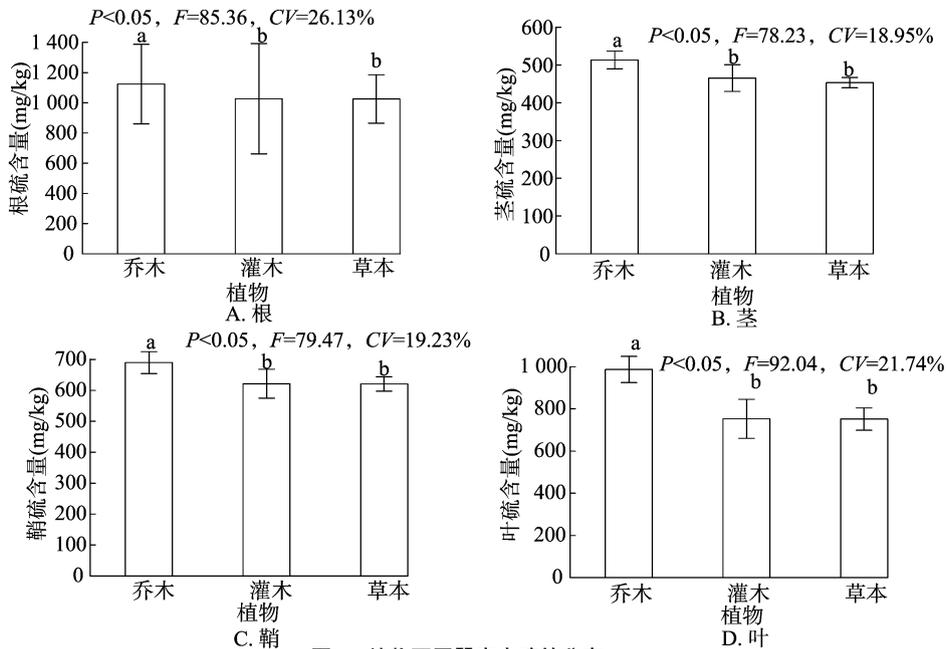


图1 植物不同器官中硫的分布

表2 不同植物不同器官中硫含量在不同季节中的变化

植物	季节	硫含量(mg/kg)			
		根	茎	鞘	叶
乔木	春季	1 124	652	752	823
	夏季	1 235	697	863	1 023
	秋季	1 043	663	814	958
	冬季	987	610	801	901
灌木	春季	1 024	623	723	798
	夏季	1 156	687	826	985
	秋季	1 003	654	798	921
	冬季	927	587	754	823
草本	春季	998	584	603	768
	夏季	1 056	628	785	854
	秋季	956	601	724	801
	冬季	812	562	627	773

迅速增加,达到峰值,地上部各器官对各营养元素的需求量很大,根作为营养元素的输出库,必须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,由此导致根中总硫含量在夏季最大。秋季以后,植物地上部分需要从根部转移大量的营养元素来满足生长需要,从而导致根中总硫含量

逐渐下降,之后,地上部各器官渐趋衰老,作为多年生植物,根需要积累大量的营养元素以供冬季呼吸消耗,因此地上部各器官的营养元素开始向地下转移,从而导致根中总硫含量再次迅速增加。根中硫素含量波动较大,说明根是硫素的重要“集散库”,它对于地上部硫素供给有着重要意义。

2.3 土壤中总硫和有效硫的剖面分布

从表3可以看出,对于乔木而言,土壤全硫平均含量在土壤剖面上从上到下依次为1 152、823、321、305 mg/kg,呈明显的分层性,即随着剖面的加深,总硫含量逐渐降低;土壤有效硫呈逐渐降低趋势,变化范围在35.1~95.6 mg/kg。对于灌木而言,土壤全硫平均含量在土壤剖面上从上到下依次为1 029、756、302、301 mg/kg,呈明显的分层性,即随着剖面的加深,总硫含量逐渐降低;土壤有效硫呈逐渐降低趋势,变化范围在32.7~92.3 mg/kg。对于草本而言,土壤全硫平均含量在土壤剖面上从上到下依次为987、623、265、258 mg/kg,呈明显的分层性,即随着剖面的加深,总硫含量逐渐降低;土壤有效硫呈逐渐降低趋势,变化范围在31.0~85.3 mg/kg。相同土层,土壤全硫和有效硫均表现为乔木>灌木>草本。

表3 土壤中总硫和有效硫的剖面分布特征

项目	土壤深度 (cm)	乔木		灌木		草本	
		平均值(mg/kg)	CV(%)	平均值(mg/kg)	CV(%)	平均值(mg/kg)	CV(%)
全硫	0~10	1 152	25.16	1 029	26.25	987	19.52
	>10~20	823	23.01	756	23.14	623	17.16
	>20~30	321	15.09	302	16.28	265	13.02
	>30~40	305	13.78	301	15.97	258	15.47
	有效硫	0~10	95.6	13.25	92.3	15.12	85.3
>10~20		53.1	12.78	46.3	14.02	42.4	14.78
>20~30		52.4	9.25	45.1	8.65	41.8	9.23
>30~40		35.1	8.78	32.7	7.14	31.0	8.17

2.4 不同深度土壤中总硫和有效硫的季节变化

从表4可以看出,对乔木来说,各层次土壤总硫和有效硫

呈一致的季节性变化规律,在夏季达到最大,之后有所降低;在垂直分布上,随着土层深度的增加逐渐减少,在>30~

40 cm 土层最小。对于灌木来说,各层次土壤总硫和有效硫呈一致的季节性变化规律,在夏季达到最大,之后有所降低;在垂直分布上,随着土层深度的增加逐渐减少,在 >30 ~ 40 cm 土层最小。对于草本来说,各层次土壤总硫和有效硫

呈一致的季节性变化规律,在夏季达到最大,之后有所降低;在垂直分布上,随着土层深度的增加逐渐减少,在 >30 ~ 40 cm 土层最小。相同季节均表现为乔木 > 灌木 > 草本。

表4 不同植物不同深度土壤中总硫和有效硫的季节变化动态

项目	土壤深度 (cm)	硫含量(mg/kg)											
		乔木				灌木				草本			
		春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季
全硫	0 ~ 10	985	1 352	1 204	1 116	953	1 287	1 103	1 047	912	1 158	1 024	978
	>10 ~ 20	912	1 278	1 077	903	789	923	901	856	569	721	703	654
	>20 ~ 30	256	425	421	326	268	389	352	278	241	351	321	268
	>30 ~ 40	261	423	389	354	262	375	351	277	217	364	304	247
有效硫	0 ~ 10	89.5	112.5	105.7	92.4	85.3	114.2	105.7	85.7	81.5	105.3	92.7	84.2
	>10 ~ 20	46.9	62.5	58.4	52.1	42.5	59.8	52.7	47.9	41.3	49.8	47.2	35.3
	>20 ~ 30	49.8	61.3	62.2	43.7	38.9	52.1	43.5	41.7	35.6	49.8	42.7	39.4
	>30 ~ 40	32.4	42.3	36.8	33.1	30.4	39.4	38.6	32.7	29.8	35.6	31.0	25.7

2.5 土壤总硫含量分布与土壤理化因子的关系

土壤保持硫元素的能力主要取决于土壤的理化性质。从表5可以看出,根硫与有机碳、全氮、全钾含量呈极显著正相关,与有效氮、有效磷呈显著正相关,与盐度呈显著负相关;茎硫与全氮呈显著正相关;鞘硫与全磷、有效磷呈显著正相关;叶硫与有机碳、全钾呈显著正相关;土壤全硫与有机碳、全氮、全钾、有效磷呈极显著正相关,与有效氮呈显著正相关,与盐度呈极显著负相关;土壤有效硫与有机碳、全氮、全钾、有效氮、有效磷呈极显著正相关,与盐度呈显著负相关。

表5 土壤中总硫和有效硫含量与土壤理化因子的关系

项目	相关系数					
	植物硫				土壤硫	
	根	茎	鞘	叶	全硫	有效硫
有机碳	0.869 **	0.236	0.158	0.569 *	0.896 **	0.902 **
全氮	0.723 **	0.504 *	0.326	0.158	0.914 **	0.867 **
全磷	0.036	0.195	0.529 *	0.314	0.287	0.378
全钾	0.752 **	0.320	0.120	0.569 *	0.756 **	0.783 **
有效氮	0.598 *	0.302	0.415	0.327	0.678 *	0.765 **
有效磷	0.612 *	0.024	0.566 *	0.324	0.758 **	0.823 **
盐度	-0.569 *	-0.025	-0.156	-0.257	-0.744 **	-0.563 *

注:“**”表示相关性在0.01水平上显著,“*”表示相关性在0.05水平上显著。

2.6 植物-土壤硫含量的主成分分析

本研究中主成分分析以土壤和植被硫含量作为原变量,通过计算变量方差和协方差矩阵的特征量,将多个变量通过降维对硫含量信息进行集中和提取,识别出起主导作用的土壤或植被硫含量。从表6可以看出,第1、第2主成分特征值占总方差的比例已经大于94%,即前2个主成分对13个监测指标所涵盖的大部分信息进行了概括,其中,第1主成分携带的信息最多,达到79%以上,第1、第2主成分的累计贡献率达到92.405%,而主成分3、4对总方差的贡献很小,因此,选取前2个因子作为主成分。从表7可以看出,土壤-植被硫含量对应于2个主成分的荷载值,反映了主成分与变量的相关系数,荷载值大的即可认为是重要因子。第1主成分对原始变量的解释贡献了总方差的81.280%,负荷值最高的几

个指标分别为土壤有机碳和全氮(分别为0.856、0.791,以绝对值>0.7判定负荷值较高),表明土壤有机碳和全氮是影响土壤-植被硫含量的主要因子。

表6 观测指标总方差分解

主成分	特征值及贡献率		
	特征值	贡献率(%)	累积贡献率(%)
1	63.154	81.280	71.280
2	18.126	11.125	92.405
3	2.417	6.369	98.774
4	0.369	1.226	100

表7 主成分载荷矩阵

项目	主成分	
	1	2
土壤全硫	0.801	0.368
土壤有效硫	0.236	0.964
根硫	0.514	-0.365
茎硫	-0.307	0.234
鞘硫	0.236	0.701
叶硫	0.156	0.258
有机碳	0.856	0.863
全氮	0.791	0.741
全磷	0.623	-0.342
全钾	0.147	0.416
有效氮	0.265	0.522
有效磷	-0.389	0.434
盐度	-0.365	-0.567

3 讨论与结论

试验结果,土壤有机质的垂直分布对土壤中硫的垂直分布形成明显的制约关系,且存在显著的正相关关系,说明土壤中硫成分分布与有机质关系密切。从地表至20 cm深的土壤层而言,土壤的平均硫含量超过了700 mg/kg。土壤中的有效硫含量随着土壤剖面的变浅而增加,这种分布变化趋势与土壤总硫含量的垂直分布基本吻合。有效硫含量在土壤吸附性及枯枝落叶、淋溶等影响下出现很大的分布差异^[20-21]。有机质含量与土壤剖面深度呈负向的变化趋势,剖面越深有机

质含量越少,而与之相对应的是不断减弱的 SO_4^{2-} 吸附能力,此外随着剖面的加深土壤质地也更加黏重紧实,淋溶作用降低导致离子迁移能力显著下降,这样在土壤深度不断加大的情况下有效硫含量在减低,另外,枯枝落叶等腐殖质也是形成 SO_4^{2-} 的一个有效途径之一,但其一般集中于土壤表层,因而会在土壤上层形成较高含量的有效硫^[20-21]。

在植物的生长季节内,土壤层次不同其硫的分布也具有明显的差异,但总体来说,明显出现了先降后升再降的变化趋势,植物根系主要集中在地表至地下10 cm的深度,植物生长对该层土壤硫含量产生的影响最大,导致其土壤硫含量与根中硫的变化明显相反。植物最旺盛的生长季节当属于夏季,在此生长季节大量的土壤养分被根系吸收利用,只有这样才能促进植物的不断生长发育,在此期间根系不仅养分的吸收量加大,同时还进行了相应的能量储存,这样根系中的硫含量也会相应增加,直接造成土壤中部分硫转换为根系硫含量,最终导致土壤中硫含量显著下降^[22-23]。此外,微生物也在夏季表现出更高的活性,这样能够加速其对植物残体的分解,导致土壤中相关营养元素含量增加,土壤硫含量也相应增加。秋季因降雨较多而形成明显的地表积水,淋溶作用能够加速土壤表层硫的损失,从而将地表硫含量转向地下。土壤总硫含量在冬季出现了明显的低谷,因为冬季植物生长显著减缓,但是根系会进行大量的养分储存以满足植物冬季的基本生存需要,这样土壤中的硫被根系随着营养的吸收而转换至根系,导致土壤中硫含量显著降低。除了土壤母质的影响外,人类对土地的开发及植被的降解等都会对硫的分异带来重要影响,植被通过对土壤盐度的影响来对硫关键因子产生作用^[22-23]。不仅土壤有机质的分布直接影响硫含量,土壤中氮含量也对硫的分布具有明显的影响,一般而言土壤硫含量与有机质含量呈正相关关系,硫元素能够通过 FeS_2 的形式进行积累,植物枯落物的分解以及根系的吸收迁移等都能显著影响土壤硫的分布及其含量。

植物体中硫的来源一般有2种途径:一是植物叶片在吸收空气时将其中的硫吸入,二是根系在进行土壤养分吸收时将其中的硫成分吸入,因此,可以通过这2种途径来利用植物加强对硫的降低,改善环境质量,减轻硫污染^[11]。通过研究发现,植物对硫元素的作用会因空间、物种及组织部分的不同而出现较明显的差异,硫含量(干质量)在植物组织中达到近6%,并受到环境污染状况的影响。植物叶片在进行光合作用的过程中对空气中沉降的硫进行吸收,一部分硫被消耗掉,另一部分则留在植物体内。植物多数的生物量集中在枝干部分,且植物生长时间越长,其中的硫含量相对越高,因此也就意味着更大的硫储存空间,在降低硫污染时这一点不容忽视^[24]。虽然煤炭等高硫污染的能源在逐渐淘汰,但是汽车尾气等带来的硫污染依然不容忽视,要充分利用绿植来降低空气中的硫含量。

参考文献:

[1] 马睿. 大气中含硫污染物污染及防治对策研究[J]. 低碳世界, 2015(11): 9-10.
[2] 高存荣, 冯翠娥, 刘文波, 等. 地壳表层硫的循环与污染地下水模式[J]. 地球学报, 2014, 35(6): 741-750.

[3] 蔺芳, 张家洋. 南京市不同功能区15种园林植物叶片铅、铜、氯、硫质量分数的差异性分析[J]. 浙江农林大学学报, 2015, 32(5): 809-814.
[4] 张颖, 蒋建立, 何天友, 等. 3个竹种硫含量季节变化[J]. 福建林业科技, 2013, 40(2): 60-63.
[5] 徐宇, 肖化云, 郑能建, 等. 维管束植物樟树和马尾松叶组织氮、硫含量指示贵阳地区大气氮、硫沉降的空间变化[J]. 环境科学, 2016, 37(6): 2376-2382.
[6] 石辉, 武云飞, 唐占铎, 等. 植物叶的波动性不对称对空气污染的响应及其指示功能[J]. 西北植物学报, 2016, 36(7): 1450-1455.
[7] 吴清华, 闵兴玲, 周永章, 等. 珠江三角洲环境梯度上葫芦藓中硫、氮含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 的差异及其环境指示[J]. 热带地理, 2013, 33(5): 542-548, 561.
[8] 李韵诗, 冯冲凌, 吴晓芙, 等. 重金属污染土壤植物修复中的微生物功能研究进展[J]. 生态学报, 2015, 35(20): 6881-6890.
[9] 许建, 贾凯, 朱君芳, 等. 氮硫互作提高大蒜氮、硫含量及其关键同化酶活性[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(2): 434-443.
[10] 何涛, 孙志高, 李家兵, 等. 闽江河口不同淹水环境下典型湿地植物-土壤系统全硫含量空间分布特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 246-254.
[11] 裴英才, 陈步峰, 邹志谨, 等. 珠江三角洲不同污染梯度下森林优势种叶片和枝条S含量比较[J]. 生态学报, 2013, 33(19): 6114-6120.
[12] 宋彬, 王得祥, 张义, 等. 延安15种园林树种叶片硫含量特征分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(5): 91-96.
[13] 王丽华, 刘尉, 徐波, 等. SO_2 胁迫下桉木叶片硫含量及其生理响应[J]. 亚热带植物科学, 2017, 46(1): 1-7.
[14] 张家洋, 蔺芳. 18种绿化树木叶片铅、镉、氯、硫含量的比较[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(6): 71-75.
[15] 张家洋. 新乡市2种常见绿化植物叶片及叶面降尘的硫含量研究[J]. 西南林业大学学报, 2016, 36(4): 167-170.
[16] 彭勇, 陈刚, 涂利华, 等. 巨桉和天竺桂幼树对不同浓度 SO_2 的光合生理响应[J]. 西北植物学报, 2014, 34(1): 150-161.
[17] 杨璐, 依丽米努尔, 朱苗苗, 等. 植物叶片中硫含量测定方法研究[J]. 应用化工, 2015, 44(3): 575-579.
[18] 王明锐, 李静, 张惠贤, 等. 土壤中有效磷和有效硫含量的同时测定方法研究[J]. 绿色科技, 2017(11): 221-222.
[19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
[20] 刘潇潇, 王钧, 曾辉. 中国温带草地土壤硫的分布特征及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2016, 36(24): 7919-7928.
[21] 林慧娜, 傅娇艳, 吴浩, 等. 中国主要红树林湿地沉积物中硫的分布特征及影响因素[J]. 海洋科学, 2009, 33(12): 79-82.
[22] 李男, 肖化云, 陈永忠, 等. 江西省表层土壤和苔藓硫含量及硫同位素组成对比研究[J]. 环境科学, 2013, 34(10): 3782-3787.
[23] 刘根林, 戚金亮, 喻德跃, 等. 根际箱种植富含硫氨基酸转基因大豆对土壤硫转化酶活性及微生物功能多样性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(1): 103-110.
[24] 颜洪涛, 顾沈华, 刘丽月, 等. 嘉兴市化工区土壤-植物-大气连续体硫氟含量水平变异特征[J]. 生态环境学报, 2017, 26(3): 473-478.