

DOI: 10.5846/stxb201506111184

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.生态学报,2016,36(24): - .

Liu X X, Wang J, Zeng H. Spatial variation in surface soil sulfur in the temperate grasslands of china and environmental constraints. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(24): - .

中国温带草地土壤硫的分布特征及其与环境因子的关系

刘潇潇¹, 王 钧¹, 曾 辉^{1,2,*}

1 北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院, 深圳 518055

2 北京大学城市与环境学院生态学系, 北京 100871

摘要:以内蒙古和青藏高原的 6 种主要草地类型为研究对象,分析了不同类型草地表层土壤硫(S)的分布特征及其与环境因子的关系。结果表明:1)青藏高原草原表层土壤(0—10 cm)的全硫含量(430.8 mg/kg)显著高于内蒙古草原(181.4 mg/kg; $P < 0.01$)。土壤硫素一般以有机硫的形式存在,具有植物有效性的土壤无机硫所占比例较少,内蒙古土壤这一比例为 14.7%,青藏高原为 24.5%。2)土壤硫的含量与土壤 C、N 的分布格局关系紧密,呈显著正相关关系;与土壤 pH 呈负相关关系。内蒙古与青藏高原研究区土壤的 C/S 和 N/S 值较低,这表明硫可能成为对草原生产力起限制性作用的营养元素。3)内蒙古草原表层土壤全硫、水溶性硫、吸附性硫均与年均温呈显著负相关($P < 0.05$);土壤硫与年均降水呈显著正相关关系($P < 0.05$)。青藏高原草地土壤硫中,除水溶性硫与年均降水呈显著正相关关系外,其余土壤硫含量均未与气候因子呈现显著相关关系。

关键词:表层土壤;全硫;无机硫;温带草原

Spatial variation in surface soil sulfur in the temperate grasslands of china and environmental constraints

LIU Xiaoxiao¹, WANG Jun¹, ZENG Hui^{1,2,*}

1 Department of Urban Planning and Design, Shenzhen Graduate School of Peking University, Shenzhen 518055, China

2 Department of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: Using field data collected in six major temperate grasslands on the Inner Mongolian Plateau and the Tibetan Plateau (Qinghai and Tibet), we analyzed spatial variation in surface soil sulfur and associated environmental constraints. The concentration of sulfur in surface soil (i.e., 0—10 cm depth) was significantly higher in the Tibetan grasslands (430.8 mg/kg) than in the Inner Mongolian grasslands (181.4 mg/kg). The surface soil sulfur was mainly in organic form, and there was relatively little inorganic sulfur at the sampling sites that can be absorbed by plants. The percentages of inorganic sulfur at the sampling sites in the Tibetan and Inner Mongolian grasslands were 24.5% and 14.7%, respectively. The concentrations of surface soil sulfur were significantly positively related to surface soil carbon and nitrogen and negatively related to soil pH. The C/S and N/S ratios were low in all of the study sites, indicating that sulfur could be the major nutrient constraint in vegetation productivity in the temperate grasslands of China. In the Inner Mongolian grasslands, the concentrations of total sulfur, solvent sulfur, and adsorbed sulfur were significantly positively related to annual precipitation and negatively related to annual mean temperature. However, in the Tibetan grasslands, most sulfur types were not associated with climatic factors, except for solvent sulfur, which was significantly positively related to annual precipitation.

基金项目:国家重大基础研究专项(2012CB956303)

收稿日期:2015-06-11; **网络出版日期:**2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zengh@pku.edu.cn

Key Words: surface soil; total sulfur; inorganic sulfur; temperate grasslands

硫是植物生长发育所必需的矿质营养元素,其营养功能和循环机制与氮素相似,作物需硫量与需磷量基本相当^[1]。硫也是参与生物地球化学循环的主要元素,硫化物以其多样的形态在陆地生态系统中发挥着重要的生态功能^[2]。在植物—土壤系统中,约有 95%—98% 的硫素贮存于土壤亚系统中,植物体所需要的硫主要来自于根系对土壤中无机硫(SO_4^{2-} -S)的吸收^[3]。但近年来,随着大气硫沉降的减少和无硫肥料的大量使用,硫元素在各生态系统土壤中呈明显下降趋势,继而引发植物的缺硫症状频现^[4],土壤缺硫已成为全球性的问题^[5]。因此,研究土壤中各形态硫素的空间分布特征及其与环境因子的相关关系,不仅可反映出不同类型草原土壤硫素供给状况及其可利用水平,还在一定程度上对草原系统生产力、草原生态系统的稳定与健康产生深刻影响。然而,目前对于中国温带草原土壤中硫素的含量及形态等方面的研究还存在空缺。

我国草地资源极为丰富,草原总面积近 4 亿公顷,约占全国土地总面积的 40%^[6]。其中,内蒙古高原和青藏高原是我国两大草原资源区,且对气候和环境变化十分敏感。内蒙古草原所代表的半干旱温带草原生态系统^[7],以及青藏高原的高寒草原所代表的亚洲中部高寒生态系统^[8],均具有区域典型性且跨越了不同水分、温度梯度和土壤类型。以往我国草原土壤研究主要着重于碳、氮等元素的空间分布特征和循环机制^[9-10],对硫素的研究较少。本文以内蒙古高原温带草原土壤和青藏高原高寒草原为研究对象,依据采集土壤样品的实测数据,探讨(1)草原表层土壤含硫状况,对比两地土壤硫素性质的异同;(2)环境因子对草原土壤硫的含量、形态组成及空间分布特征的影响。以期为正确理解陆地生态系统硫素循环过程及其对全球变化效应与反馈提供基础资料。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究对象为内蒙古温带草原土壤和青藏高原高寒草原土壤,研究区域包括内蒙古、青海、西藏 3 个省区。内蒙古温带草原研究区年平均气温变动在 $-3\sim 8^{\circ}\text{C}$,年均降水量自东向西由 500mm 递减为 100mm 左右。包括 3 种天然草地类型:草甸草原主要位于锡林郭勒草地东北部以及呼伦贝尔地区,优势种为贝加尔针茅(*Stipa baicalensis* Roshev)、羊草等;典型草原主要分布于锡林郭勒草地的中东部地区,主要建群种为大针茅(*Stipa grandis*)、克氏针茅(*Stipa kirylovii*)等;荒漠草原位于内蒙古西部地区,优势物种为短花针茅(*Stipa breviflora* Griseb)。青藏高原研究区气候类型独特而复杂,温度较低且降水季节差异明显^[11]。青藏高原东北部祁连山地区的高寒草甸,平均海拔为 3215 m;高寒草原主要分布于青藏高原中部的藏北高原地区,海拔最高,平均达到 4600m 以上,气候寒冷,年均温均在 0°C 以下;藏南地区山地灌丛草原纬度较低,气候最为温暖湿润,年均温为 5°C 左右。

1.2 样品采集与测定方法

本研究中的采样地选取人为干扰较少的天然草地,包括 16 个青藏高原样地(高寒草甸 4 个、高寒草原 4 个、山地灌丛草原 8 个)和 16 个内蒙古样地(草甸草原 6 个、典型草原 6 个、荒漠草原 4 个)(图 1),分别采集于 2012 年夏季和 2013 年夏季。每处样地随机选取 3 处样点,采集 0—10 cm 的表层土壤,放入自封袋中带回实验室。每处样地土壤样品最终由该地 3 处样点的表层土壤均匀混合而成。采样点位置利用 GPS 定位。

土壤样品经自然风干、去除细根及杂质后,一部分过 10 目土壤筛,用于测定土壤无机硫;一部分使用研磨仪研磨后过 100 目筛,用于测定土壤碳、氮及全硫含量。土壤水溶性硫和吸附性硫分别以 H_2O 和 KH_2PO_4 (500mg/L P) 溶液为浸提剂^[12],浸提液过滤后于电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP-AES)测定^[13],无机硫含量为水溶性硫与吸附性硫之和^[14];土壤 C、N、S 含量使用元素分析仪(Vario Microcube;Elementar, Hanau, 德国)测定;有机硫由全硫和无机硫的差值获得;pH 值采用酸度计测定,水土比为 2.5:1.0。

1.3 数据处理

实验数据采用 Microsoft Excel 2010 进行整理并制图,并用 SPSS 18.0 for windows 软件进行统计分析。内

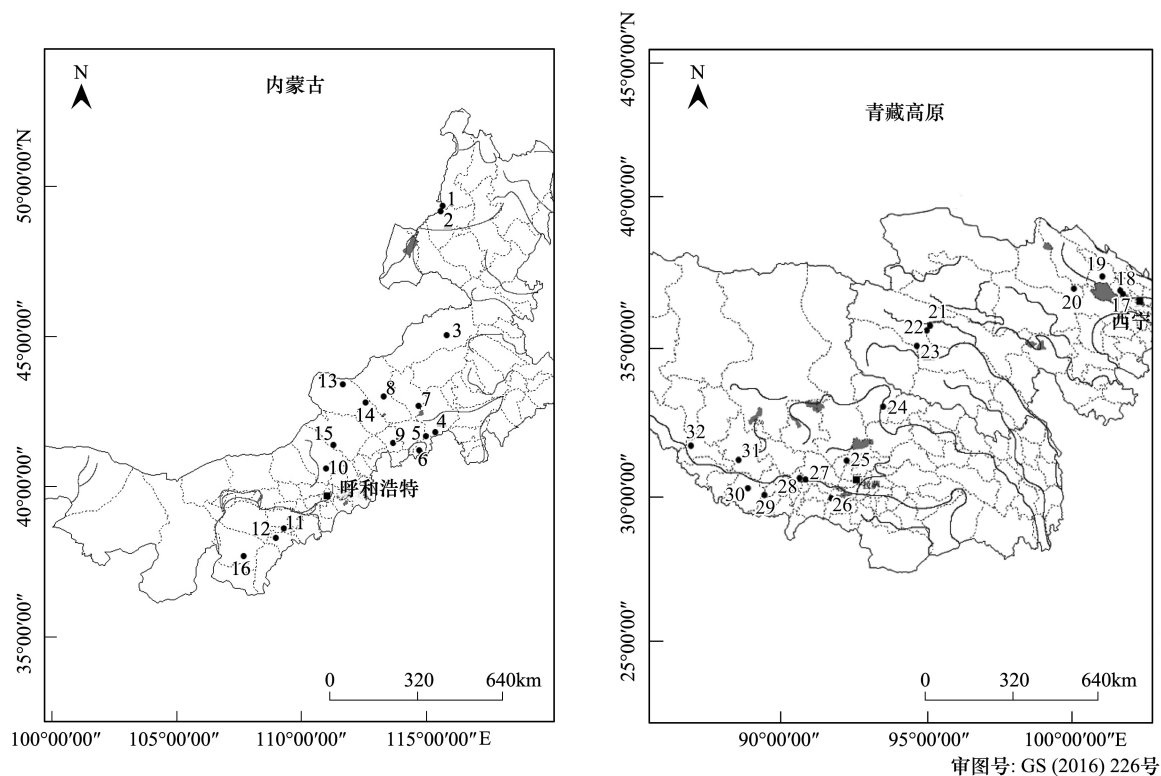


图1 内蒙古(a)和青藏高原(b)采样点

Fig.1 The sampling sites of Inner Mongolia (a) and Qinghai-Tibet Plateau (b)

蒙古和青藏高原土壤硫含量的差异比较采用独立样本 t 检验;运用 Pearson 相关分析进行土壤因子、气候因子与土壤硫含量之间的相关性分析。

2 结果与分析

2.1 表层土壤的基本性质

内蒙古和青藏高原研究区 32 个样地表层土壤的 pH、C、N 含量,如表 1 所示。其中,表层土壤 pH 为 6.3—8.4,内蒙古草甸草原土壤 pH 明显较低,呈弱酸性。青藏高原土壤的 C、N 平均含量 (26.1g/kg、2.1g/kg) 均高于内蒙古土壤 (16.7g/kg、1.5g/kg)。其中,内蒙古荒漠草原表层土壤的 C、N 含量最低,平均值仅为 4.6 g/kg 和 0.48 g/kg;青藏高原高寒草甸表层土壤 C、N 平均含量最高,分别为 51.4 g/kg 和 4.4 g/kg。研究区样地土壤 C/N 值为 6.8—36.2;相比之下,土壤 C/S 值 (4.7—224.5) 的变幅更大,且与 N/S 值呈显著正相关关系 ($r = 0.739^{**}$, $n = 32$, $P < 0.01$)。内蒙古研究区表层土壤的 C/S 平均值、N/S 平均值显著高于青藏高原 ($P < 0.05$ 、 $P < 0.01$)。C/S 值最高和最低的草地类型分别为典型草原 (106.1) 和山地灌丛草原 (45.7);而 N/S 值最高和最低的草地类型分别为草甸草原 (9.2) 和高寒草原 (2.8)。

表 1 内蒙古和青藏高原样点位置及表层土壤化学性质

Table 1 Some information and soil chemical characteristics

类型 Types	编号 No. ⁽¹⁾	样点 Sites	年均温 MAT/℃	年均降水 MAP /mm	pH	C /g/kg	N /g/kg	S/ (mg/kg)	C/N	C/S	N/S
草甸草原	1		-1.8	327.6	6.8	28.1	2.8	287.4	10.0	97.9	9.8
Meadow grassland	2	八大	-2.7	322.0	6.3	37.1	3.3	324.0	11.1	114.6	10.3
	3	东乌旗	0.6	307.3	7.0	20.2	2.0	222.3	9.9	90.8	9.2
	4		-1.5	424.0	6.4	45.4	3.9	374.7	11.7	121.1	10.4

续表

类型 Types	编号 No. ⁽¹⁾	样点 Sites	年均温 MAT/℃	年均降水 MAP /mm	pH	C	N	S/	C/N	C/S	N/S
						/g/kg		(mg/kg)			
典型草原 Typical grassland	5		3.1	416.2	6.6	19.1	1.8	194.9	10.5	98.1	9.3
	6		3.3	396.5	7.4	12.1	1.3	221.8	9.1	54.5	6.0
	7	锡林浩特	3.3	339.9	7.7	18.1	1.8	202.3	10.1	89.6	8.9
	8	阿巴嘎旗	2.6	239.5	7.3	11.3	1.2	139.3	9.4	80.9	8.6
	9	正镶白旗	3.6	357.3	7.7	14.3	1.6	232.7	8.7	61.6	7.1
	10	四子王旗	4.4	275.9	7.6	11.5	1.3	148.6	8.6	77.2	9.0
荒漠草原 Desert grassland	11	东胜区	7.3	359.1	7.5	19.4	0.88	86.3	22.1	224.5	10.2
	12	伊金霍洛旗	7.5	330.7	8.3	11.7	0.69	114.2	17.0	102.5	6.0
	13	苏尼特左旗 A	4.1	202.3	7.7	4.1	0.46	75.1	9.0	54.9	6.1
	14	苏尼特左旗 B	4.1	219.5	7.5	5.5	0.70	93.8	7.9	58.7	7.4
	15	苏尼特右旗	5.7	187.0	8.2	4.6	0.55	91.6	8.4	50.1	6.0
	16	鄂托克旗	7.9	260.5	8.1	4.0	0.22	92.7	18.7	43.5	2.3
高寒草甸 Alpine meadow	17	海晏县 A	1.5	527.6	8.0	34.2	3.4	768.3	10.0	44.5	4.5
	18	海晏县 B	1.5	451.7	7.8	40.0	4.2	418.9	9.6	95.6	10.0
高寒草原 Alpine grassland	19	刚察县	0.5	406.2	6.7	101.3	8.1	842.9	12.4	120.2	9.7
	20	乌兰县	0.7	285.9	7.7	30.2	1.7	378.4	17.4	79.9	4.6
	21	曲麻莱县 A	-4.5	282.2	8.2	30.7	1.8	327.2	17.0	94.0	5.5
	22	曲麻莱县 B	-4.5	307.3	8.1	14.9	0.76	471.9	19.7	31.6	1.6
	23	治多县	-2.9	316.8	7.9	13.0	0.36	232.3	36.2	56.0	1.5
	24	安多县	-1.8	431.3	7.8	14.6	0.51	185.8	28.9	78.7	2.7
山地灌丛草原 Mountain shrubby grassland	25	当雄县	2.6	428.3	7.4	59.7	5.5	752.8	10.9	79.3	7.3
	26	浪卡子县	3.6	387.0	7.3	27.1	3.2	508.9	8.4	53.2	6.4
	27	日喀则 A	6.3	365.2	8.2	4.9	0.47	111.1	10.5	44.3	4.2
	28	日喀则 B	7.2	358.8	8.0	11.4	0.52	408.9	21.9	28.0	1.3
	29	定结县	7.5	318.0	8.4	5.3	0.38	306.6	13.9	17.2	1.2
	30	定日县	3.7	302.4	7.9	3.8	0.54	806.9	7.0	4.7	0.67
	31	昂仁县	6.5	285.6	8.0	6.4	0.95	181.6	6.8	35.2	5.2
	32	萨嘎县	3.2	254.0	8.0	19.7	0.96	190.3	20.4	103.4	5.1

(1) 编号与图 1 中标出的编号地点一致

2.2 表层土壤硫素含量及分布格局

2.2.1 土壤全硫

如表 1 所示,青藏高原样地的表层土壤全硫平均含量(430.8 mg/kg)显著高于内蒙古草原土壤(181.4 mg/kg, $P < 0.01$)。内蒙古土壤的全硫大致呈现东部高、西部低的分布格局,总体上为草甸草原(270.9 mg/kg) > 典型草原(153.9 mg/kg) > 荒漠草原(88.3 mg/kg)。而青藏高原由于受到独特的气候与地形的共同影响,表层土壤全硫水平分布特征与内蒙古草原有明显区别。全硫含量由青藏高原东北部至西南部总体呈现高-低-高的格局,含量为 111.1—842.9 mg/kg,变异程度大于内蒙古土壤全硫。山地灌丛草原表层土壤全硫平均含量低于高寒草甸且高于高寒草原,并且其各样地间的全硫含量变异性最大(图 2),变异系数高达 64.5%。

2.2.2 无机硫

土壤无机硫对于植物来说是最为直接的硫素来源,是植物有效硫的主要组成部分,包括水溶性硫和吸附性硫^[15]。从图 2 可以看出,土壤中大部分的硫以有机态形式存在;内蒙古土壤无机硫所占比例较低,约占全硫的 14%;青藏高原土壤的这一比例更高,且最高的为高寒草原土壤(32.1%);在无机硫中,水溶性硫的含量较多,而吸附性硫含量较少。

水溶性硫(H_2O-S)是指存在于土壤溶液中的无机硫,是最易被植物吸收利用的形态,但同时易受到多种

环境因素的影响,含量分布变异性较大。内蒙古表层土壤水溶性硫的平均含量为 18.4 ± 10.2 mg/kg,且草甸草原 (26.5 mg/kg) > 典型草原 (16.0 mg/kg) > 荒漠草原 (10.1 mg/kg),与全硫分布格局相同。而这 3 种草地类型土壤的水溶性硫所占比例却依次增加,分别为 9.8%、10.4% 和 11.4%。与土壤全硫相同,青藏高原土壤的水溶性硫平均含量 (83.9 mg/kg) 也显著高于内蒙古土壤 (18.5 mg/kg, $P < 0.01$),并且平均所占全硫比例 (20.9%) 也比内蒙古土壤高。青藏高原 3 种草地类型土壤的水溶性硫含量分布为高寒草甸 (137.8 mg/kg) > 高寒草原 (74.7 mg/kg) > 山地灌丛草原 (61.5 mg/kg)。

吸附性硫 (Adsorbed-S) 是吸附于土壤胶体表面的硫^[16],是能保证硫酸盐不易通过淋溶流失的重要无机

硫形式。如图 2 所示,青藏高原土壤吸附性硫的平均含量 (22.5 mg/kg) 高于内蒙古土壤 (7.0 mg/kg),且在全硫中所占比例也较高。其中,高寒草原土壤所含的吸附性硫比例最大 (7.5%),其次为高寒草甸 (5.4%)。

2.3 土壤硫素与环境因子的关系

总体来说,内蒙古和青藏高原表层土壤全硫、无机硫含量分别与土壤 C、N 含量呈显著正相关关系,与土壤 pH 呈显著负相关关系 (表 2)。与内蒙古草原土壤相比,青藏高原土壤的全硫与这 3 种土壤因子表现出的相关性稍弱,且土壤有机硫与土壤 pH、C、N 并未表现出明显的相关关系。此外,从表 2 可以看出,两个研究区的土壤 N 相比于土壤 C 和 pH 与土壤全硫的相关性更大,即土壤 N 可能对土壤全硫的含量影响更大。

表 2 不同形态硫与影响因子的相关关系

Table 2 Correlations between different forms of soil sulfur and impact factors

研究区 Research Areas	pH	C	N	
内蒙古	全硫 Total Sulfur	-0.787 **	0.894 **	0.964 **
Inner Mongolia	水溶性硫 H_2O-S	-0.661 **	0.812 **	0.798 **
($n = 16$)	吸附性硫 Adsorbed-S	-0.520 *	0.762 **	0.743 **
	有机硫 Organic S	-0.778 **	0.866 **	0.949 **
青藏高原	全硫 Total Sulfur	-0.574 *	0.614 *	0.676 **
Qinghai-Tibet Plateau	水溶性硫 H_2O-S	-0.446	0.744 **	0.789 **
($n = 16$)	吸附性硫 Adsorbed-S	-0.540 *	0.811 **	0.789 **
	有机硫 Organic S	-0.473	0.374	0.434

* : 显著相关 ($P < 0.05$); ** : 极显著相关 ($P < 0.01$)

内蒙古研究区 16 个样地的年均温为 $-2.7 \sim -7.9^\circ\text{C}$ (表 1),且年均降水与年均温相关关系不显著。通过对土壤全硫、水溶性硫、吸附性硫、有机硫与年均温、年均降水的相关性进行分析,结果表明 (图 3),内蒙古草原表层土壤全硫与年均温呈极显著负相关 ($r = -0.870^{**}$),与年均降水呈极显著正相关 ($r = 0.652^{**}$),即年均温越高的草原地区土壤全硫含量越少,降水量越大的地区土壤全硫含量越多。与土壤全硫相比,内蒙古土壤水溶性硫和吸附性硫与气候因子的相关性相对较弱。由于内蒙古土壤中有机硫所占比例较大,有机硫与气候因子相关关系的表现与全硫一致。

在青藏高原研究区表层土壤中,只有水溶性硫与年均降水的相关关系通过了 $P = 0.05$ 的显著性检验 ($r = 0.497^*$),其余形态的硫与气候因子的相关性均不显著。

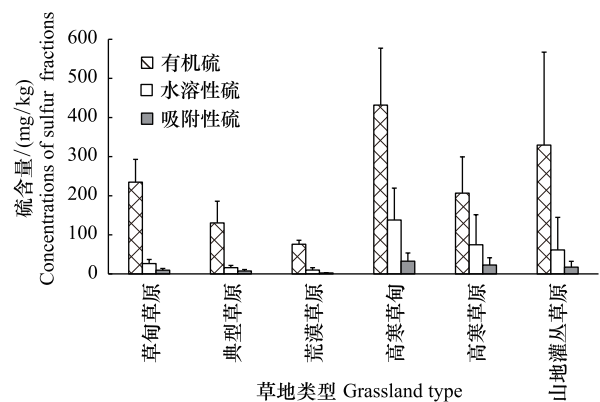


图 2 不同草原类型表层土壤各形态硫的含量

Fig. 2 Concentrations of sulfur fractions in different types of grassland

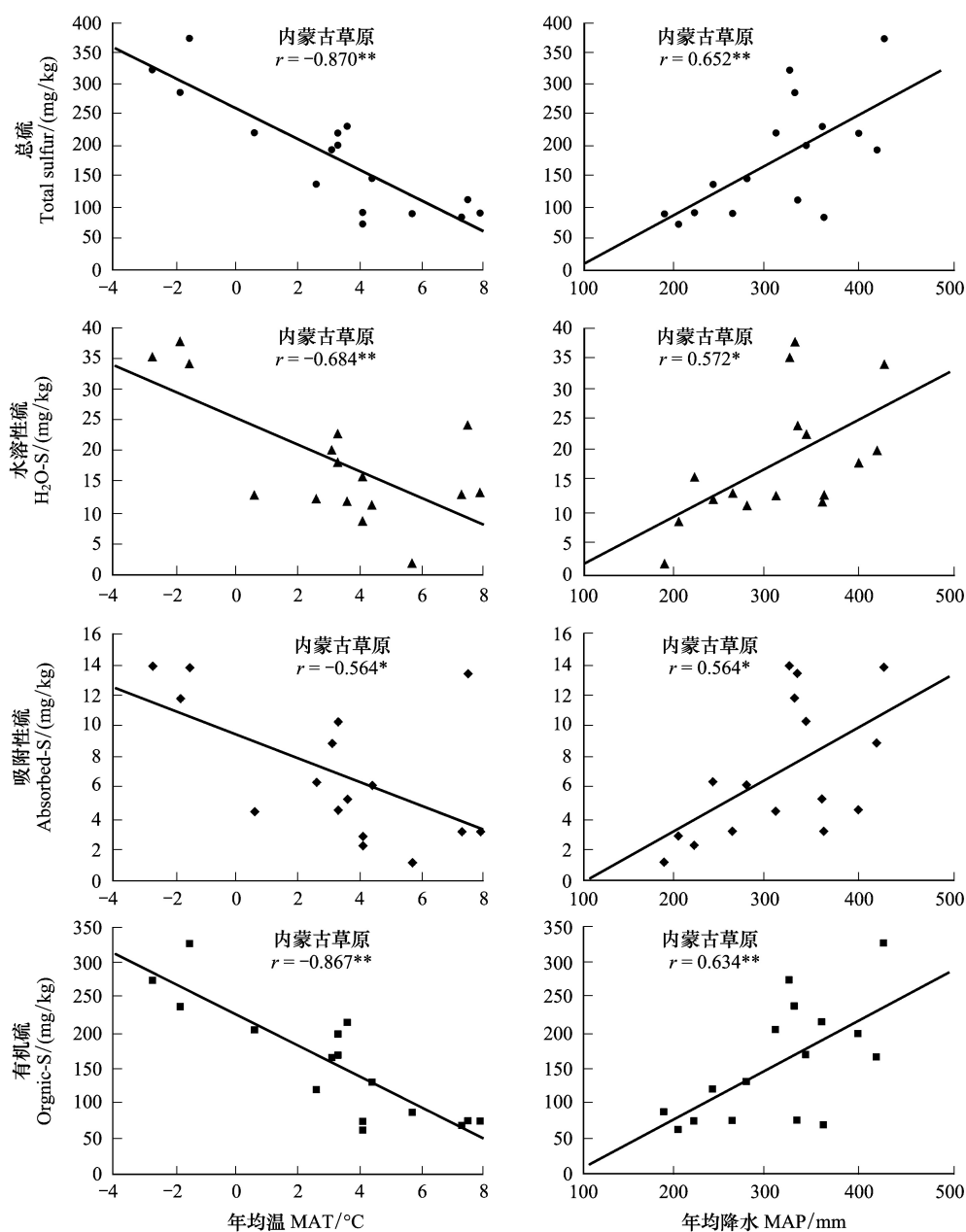


图3 内蒙古研究区土壤硫与年均温、年降水量的相关关系

Fig.3 Relationships between the average concentration of sulfur and MAT, MAP

3 讨论

3.1 内蒙古和青藏高原草原表层土壤硫素的分布特征及差异

由于样地的植被覆盖、气候特征和土壤条件不同,土壤中全硫含量差异明显^[17]。本研究中内蒙古草原表层土壤全硫含量(181.4 mg/kg)明显少于位于相同纬度范围的北美大平原草原土壤全硫含量(501.7 mg/kg)^[18],略低于汪诗平等^[5]所研究的内蒙古典型草原表层土壤全硫含量(249 mg/kg);青藏高原土壤硫含量与我国土壤平均含硫量相近,但明显低于湿润半湿润的热带土壤^[2]及湿地土壤中的硫含量^[19-20](表3)。成土条件对于土壤中元素含量的影响重大。一般来说,土壤中的硫主要来源于土壤有机质^[2,4];而在石灰性土壤中, SO_4^{2-} 会与 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 结合形成的难溶性硫酸盐形式沉积在土层中^[21],形成如石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)、泻盐

($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)等。内蒙古荒漠草原土壤以棕钙土为主^[7],土壤腐殖质累积过程弱且腐殖质层深度较浅,土壤硫与土壤 C、N 等营养元素含量都不高,表层土壤平均含硫量还不及 100 mg/kg(表 1);而青藏高原由古海洋沉积物发育而来。研究表明,海洋沉积物中硫素含量较高,且一般以酸可挥发性硫化物(AVS)、元素硫、黄铁矿、有机硫等形式存在^[22]。Kasper 等^[23]研究发现青藏高原纳木错湖水、沉积物和流入湖泊的河水中硫含量普遍较高,而入湖河水中硫来源于该流域土壤中,因此纳木错地区土壤中硫含量很高。另外由于青藏高原所处地区气候温凉而较为湿润,土壤冻结期长,有利于土壤腐殖质的累积,土壤中含硫量较高。

土壤是草原生态系统中重要的硫库,各种形态的硫相互转化和迁移构成了土壤硫的循环。土壤中无机硫的含量依赖于植物对硫的吸收、淋溶流失、含硫化肥的施加以及土壤中硫的矿化及固定过程^[24]。本研究中,内蒙古和青藏高原草原表层土壤的无机硫所占比例均高于多数湿润、半湿润地区的非石灰性土壤(约 5%)^[21],与我国东北黑土中的这一比例相近(约 20%)^[12,24]。

水溶性硫作为可直接被植物根系吸收的硫的形态,其植物有效性最大^[25],对植物早期硫的供应至关重要。但水溶性硫的流动性较强,含量分布受外界环境的影响较大;而吸附性硫则是通过阴离子交换吸收和配位吸附的方式保留在土壤胶体表面的,在土壤中的稳定性更强^[21]。土壤中的水溶性硫与吸附性硫可以相互转化并处于动态平衡。有研究表明^[21],当土壤 pH 为 3 时, SO_4^{2-} 的吸附性最大,然后随着 pH 的升高急剧下降;当 pH> 6.5 时,吸附作用就已经很不明显,在这种状态下,吸附性硫在无机硫中所占比例大大下降。这是由于弱碱性土壤中的 PO_4^{2-} 和 OH^- 都会与 SO_4^{2-} 形成竞争与阳离子结合^[26],从而降低 SO_4^{2-} 的吸附性。本研究中,内蒙古与青藏高原土壤吸附性硫均表现出随着土壤碱性的增强而减少的趋势。

表 3 中国温带草原生态系统和其他地区表层土壤全硫含量
Table 3 Soil total sulfur concentration in different ecosystems

类型 Types	全硫 Total Sulfur /(mg/kg)	文献 Reference
东北黑土 Black soil areas of Northeast China	405.0±24.2	[12]
江西省北部森林 Forest in north Jiangxi Province	491.3	[14]
闽江河口湿地 Wetland in Minjiang River estuary	1613.2±874.4	[20]
三江平原毛茛苔草沼泽 <i>Lasiocarpa marsh</i> in Sanjiang Plain	3175±606	[19]
三江平原芦苇沼泽 <i>Australis marsh</i> in Sanjiang Plain	4444±190	[19]
内蒙古锡林河流域草原 Xilin River watershed of Inner Mongolia steppe	249	[5]
北美大平原天然草地 Grassland of the Great Plains of North America	501.7±221.9	[18]
埃塞俄比亚西南部高原天然森林 Natural forest at the southwestern highlands of Ethiopia	1082	[2]
埃塞俄比亚西南部高原耕地 Cultivation at the southwestern highlands of Ethiopia	635	[2]
智利火山灰土天然草地 Natural grassland of volcanic-ash soils in Chile	610±20	[4]
内蒙古草原 Grassland in Inner Mongolia	181.4±91.9	本研究
青藏高原草原 Grassland in Qinghai-Tibet Plateau	430.8±243.3	本研究

3.2 表层土壤硫与土壤因子的关系

本研究中,土壤全硫、水溶性硫和吸附性硫都分别与土壤 C、N 呈显著正相关关系,这与 Wang^[18]、Solomon^[2,27]等人的研究结果相同。土壤硫素与土壤 C、N 之间存在的这种紧密的相关性,使硫素在土壤养分研究中具有成为限制因子的可能性^[21]。研究表明,在缺硫土壤中适当施加一定量的硫肥可使作物产量平均增加 10%^[28]。此外,本研究还发现,与土壤 C 相比,土壤 N 与土壤硫的相关关系更为紧密,这可能是由于受到地表植物对土壤中氮素和硫素吸收的影响。Nicolas 等^[29]在研究中发现,草原植物对土壤中的 N 和 S 有着相似的吸收机制,且植物体中 N 和 S 的新陈代谢关联紧密,硫素的增加会提高植物体对氮素的利用效率。

一般来讲,C/N 值是衡量土壤 C、N 营养平衡状况的指标,它的演变趋势对土壤碳、氮循环有重要影响^[30]。同样的,土壤 C/S 和 N/S 值在各生态系统中,对硫的生物化学循环过程也起到了重要的指示作用。Stevenson^[31]研究表明,C/S 值决定着土壤硫转化的方向,当这一值大于 400 时,固定作用增强;当这一值低于

200 时,土壤中的有机硫进行矿化作用;当土壤的 C/S 值在 200 到 400 之间时,土壤中的 SO_4^{2-} 既不从有机硫中释放也不用来合成有机硫。本研究中 2 个研究区的土壤 C/S 平均值都未达到 200,这意味着内蒙古和青藏高原样地土壤在当时都处于有机硫矿化的阶段。此外,J. R. BETTANY 等^[32]在对已经耕作 65 年的土壤进行研究时发现,土壤硫含量在这期间下降了 38%,土壤 C、N 含量分别下降了 44% 和 49%,土壤中 C/N/S 值变小,这表明土壤硫对于抵抗土地耕作而导致的有机质矿化的能力比 C、N 更强。对于不同的生态系统,Dawit Solomon 等人^[27]在研究中发现,温带及亚热带草原土壤的 C/S 和 N/S 值比热带森林土壤高很多,即硫素在温带草原土壤有机质中含量较低,这表明在温带草原土壤中硫素更可能成为对生产力起限制性作用的营养元素,且更加显著地影响着草原生态系统的平衡与健康。

3.3 气候因子对土壤硫的影响

本研究中,内蒙古草原土壤中各形态的硫含量均与年均温呈显著负相关,与年均降水呈显著正相关关系,与土壤 C、N 含量和气候因子之间的关系相一致(数据没有列出)。气候因子直接影响着土壤有机质的含量,因此各形态的土壤硫中,对有机硫的含量影响最大(图 3)。土壤温度与空气温度密切相关,气温越低,土壤温度则越低,作为土壤有机质主要来源的地上枯落物分解变慢,土壤有机质矿化速率也随着土壤温度的降低而下降^[18,33]。因此,在较长的时间尺度上,土壤有机质的来源并没有减少,但矿化的速度却因为温度的降低而变慢了,温度越低的地区土壤中有机硫的含量就越多。此外,Solomon 等人^[27]还在研究中发现,土壤全硫的损失量与年均温也呈显著相关关系,即年均温较高地区的土壤在经过 103 年的变化后全硫损失量更多,且土壤有机硫对温度的敏感性逐减增强。因此,即使像内蒙古草甸草原或青藏高原这种年均温较低天然草原地区,在全球气候变暖的大趋势下,也存在着土壤硫素损失进一步加剧的可能。

降水是内蒙古草原生产力的主要限制因子,内蒙古草原土壤中营养元素的有效性和土壤含水量沿草甸草原-典型草原-荒漠草原的梯度降低^[9]。相比于年均温,降水对内蒙古土壤硫含量及分布的影响程度相对较小,这与 J. Wang^[18]、Amelung^[34]等人的研究结果一致。降水条件还会影响土壤硫的淋溶、土壤侵蚀等,对于结构松散、对营养元素固持性较差的土壤,大量而集中的降水会加剧土壤硫的淋溶或随径流迁移,从而造成高降雨量地区和地势不平地带硫素的亏缺或累积^[35]。此外,随着国际社会对 SO_2 等含硫气体排放的控制,大气沉降这一土壤硫素输入来源已经较之前降低许多,但依然会有部分硫素以干湿沉降的形式进入土壤^[36],这可能也是造成降水较多的地区土壤含硫量高的原因,但其影响大小还需进一步的研究。

在对青藏高原草原各样点进行研究时,气候因子与土壤硫的含量分布并没有表现出明显的相关趋势,这可能是由高寒气候与土壤性质之间独特的影响机制所致。土壤冻融是青藏高原土壤有别于内蒙古的一种高海拔地区特有的自然现象,冻融会改变土壤的结构、含水量分布,影响着土壤各养分元素的生物地球化学循环过程。有研究表明,冻融的频次及冻融温度对土壤 C、N、P 的有效性存在较大的影响^[37],因此青藏高原的冻融作用也可能影响着土壤硫素的含量及循环过程。在这种极端环境下发育的植被和土壤对气候变化极为敏感,气候变化对青藏高原土壤硫素的分布及循环过程的影响会更为复杂,值得深入研究。

4 结论

(1) 青藏高原草原表层土壤全硫含量显著高于内蒙古表层土壤。土壤中大部分硫素以有机态的形式存在,内蒙古土壤的无机硫所占比例较低,青藏高原这一比例较高。吸附性硫易受土壤 pH 的影响,随着土壤碱性的增加,吸附性硫含量减少。

(2) 有机质是土壤中硫素的主要来源,土壤硫与土壤 C、N 含量呈显著相关关系;其中 N 与 S 的关系更为紧密,可能与地表植物对土壤中 N、S 的吸收机制相似有关。草原土壤中 C/S 和 N/S 值较低,硫将可能成为对草原生产力起限制性作用的营养元素。

(3) 气候因子对内蒙古草原土壤硫含量有一定的影响。一般来说,温度越高的地区,土壤硫素含量越少;降水越多的地区,土壤硫素含量越多,且相比于降水,温度对于土壤中硫素含量的影响更大。

参考文献 (References):

- [1] Tisdale S L, Nelson W L, Beaton J D. Soil Fertility and Fertilizers. London: Collier Macmillan Publishers, 1985.
- [2] Solomon D, Lehmann J, Tekalign M, Fritzsche F, Zech W. Sulfur fractions in particle-size separates of the sub-humid Ethiopian highlands as influenced by land use changes. *Geoderma*, 2001, 102(1/2): 41-59.
- [3] 李新华, 刘景双, 孙志高, 杨继松. 三江平原小叶章湿地生态系统硫的生物地球化学循环. *生态学报*, 2007, 27(6): 2199-2207.
- [4] Aguilera M, de la Luz Mora M, Borie G, Peirano P, Zunino H. Balance and distribution of sulphur in volcanic ash-derived soils in Chile. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(9): 1355-1361.
- [5] Wang S P, Wang Y F, Chen Z Z, Cui X Y, Schnug E, Haneklaus S. Sulphur status of soils and plants of the Inner Mongolia steppe. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25(4): 465-471.
- [6] 鲍芳, 周广胜. 中国草原土壤呼吸作用研究进展. *植物生态学报*, 2010, 34(6): 713-726.
- [7] 戴尔阜, 翟瑞雪, 葛全胜, 吴秀芹. 1980s-2010s 内蒙古草地表层土壤有机碳储量及其变化. *地理学报*, 2014, 69(11): 1651-1660.
- [8] 王根绪, 程国栋, 沈永平. 青藏高原草地土壤有机碳库及其全球意义. *冰川冻土*, 2002, 24(6): 693-700.
- [9] He N P, Wang R M, Zhang Y H, Chen Q S. Carbon and nitrogen storage in Inner Mongolian grasslands: relationships with climate and soil texture. *Pedosphere*, 2014, 24(3): 391-398.
- [10] 秦彧, 宜树华, 李乃杰, 任世龙, 王晓云, 陈建军. 青藏高原草地生态系统碳循环研究进展. *草业学报*, 2012, 21(6): 275-285.
- [11] 马建静, 吉成均, 韩梅, 张婷芳, 闫雪东, 胡东, 曾辉, 贺金生. 青藏高原高寒草地和内蒙古高原温带草地主要双子叶植物叶片解剖特征的比较研究. *中国科学: 生命科学*, 2012, 42(2): 158-172.
- [12] 迟凤琴, 汪景宽, 张玉龙, 魏丹, 周宝库, 匡恩俊. 东北 3 个典型黑土区土壤无机硫的形态分布. *中国生态农业学报*, 2011, 19(3): 511-515.
- [13] 王萍, 王雪莲, 谭小宁, 何冰. 电感耦合等离子体原子发射光谱法测定土壤中有有效硫. *四川地质学报*, 2009, 29(4): 494-496.
- [14] 李男, 肖化云, 陈永忠, 周丹, 罗笠, 吴代赦. 江西省表层土壤和苔藓硫含量及硫同位素组成对比研究. *环境科学*, 2013, 34(10): 3782-3787.
- [15] Barber S A. Soil Nutrient Bioavailability: A Mechanistic Approach. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1995.
- [16] 隋常玲, 张民. 不同控释肥对土壤无机硫组分的影响. *水土保持学报*, 2010, 24(6): 158-162, 212-212.
- [17] Kour S, Arora S, Jalali V K, Mondal A K. Soil sulfur forms in relation to physical and chemical properties of midhill soils of north India. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2010, 41(3): 277-289.
- [18] Wang J K, Solomon D, Lehmann J, Zhang X D, Amelung W. Soil organic sulfur forms and dynamics in the Great Plains of North America as influenced by long-term cultivation and climate. *Geoderma*, 2006, 133(3/4): 160-172.
- [19] 李瑞利, 柴民伟, 邱国玉, 石福臣, Kaichiro S. 三江平原典型沼泽湿地养分累积与沉积特征. *环境科学*, 2014, 35(8): 2928-2936.
- [20] 曾从盛, 王维奇, 翟继红. 闽江河口不同淹水频率下湿地土壤全硫和有效硫分布特征. *水土保持学报*, 2010, 24(6): 246-250.
- [21] Wilhelm Scherer H. Sulfur in soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2009, 172(3): 326-335.
- [22] Goldhaber M B. Sulfur-rich Sediments. *Treatise on Geochemistry*, 2003, 7:257-288.
- [23] Kasper T, Frenzel P, Habertzettl T, Schwarz A, Daut G, Meschner S, Wang J, Zhu L & Mausbacher R. Interplay between redox conditions and hydrological changes in sediments from Lake Nam Co (Tibetan Plateau) during the past 4000cal BP inferred from geochemical and micropaleontological analyses. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2013:261-271.
- [24] Zhang J M, Chi F Q, Zhou B K, Wei D, Kuang E J. Sulfur bioavailability of black soil in northeast China. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 2014, 63(S2): 172-179.
- [25] Zhou W, He P, Li S T, Lin B. Mineralization of organic sulfur in paddy soils under flooded conditions and its availability to plants. *Geoderma*, 2005, 125(1/2): 85-93.
- [26] Korentajer L, Byrnes B H, Hellums D T. The Effect of Liming and Leaching on the Sulfur-Supplying Capacity of Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1983, 47(3): 525-530.
- [27] Solomon D, Lehmann J, Kinyangi J, Pell A, Theis J, Riha S, Ngoze S, Amelung W, Du Preez C, Machado S, Ellert B, Janzen H. Anthropogenic and climate influences on biogeochemical dynamics and molecular-level speciation of soil sulfur. *Ecological Applications*, 2009, 19(4): 989-1002.
- [28] 孙丽娟, 段德超, 彭程, 何俊昱, 施积炎. 硫对土壤重金属形态转化及植物有效性的影响研究进展. *应用生态学报*, 2014, 25(7): 2141-2148.
- [29] Legay N, Personeni E, Slezacek-Deschaumes S, Piutti S, Cliquet J B. Grassland species show similar strategies for sulphur and nitrogen acquisition.

- Plant and Soil, 2014, 375(1/2): 113-126.
- [30] 张春华, 王宗明, 居为民, 任春颖. 松嫩平原玉米带土壤碳氮比的时空变异特征. 环境科学, 2011, 32(5): 1407-1414.
- [31] Uren N C. Cycles of soil: Carbon, nitrogen, sulfur, micronutrients. Soil Biology and Biochemistry, 1987, 19(5): 653.
- [32] Bettany J R, Saggar S, Stewart J W B. Comparison of the amounts and forms of sulfur in soil organic matter fractions after 65 years of cultivation. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(1): 70-75.
- [33] 刘伟, 程积民, 高阳, 程杰, 梁万鹏. 黄土高原草地土壤有机碳分布及其影响因素. 土壤学报, 2012, 49(1): 68-76.
- [34] Amelung W, Zech W, Zhang X, Follett R F, Tiessen H, Knox E, Flach K W. Carbon, Nitrogen, and Sulfur Pools in Particle-Size Fractions as Influenced by Climate. Soil Science Society of America Journal, 1998, 62(1): 172-181.
- [35] 王凡, 朱云集, 路玲. 土壤中的硫素及其转化研究综述. 中国农学通报, 2007, 23(5): 249-253.
- [36] 胡正义, 王体健, 曹志洪, 李宗恺, 刘崇群, 赵言文. 大气干沉降向农田生态系统输入硫素通量研究. 土壤学报, 2001, 38(3): 357-364.
- [37] 谢青琰, 高永恒. 冻融对青藏高原高寒草甸土壤碳氮磷有效性的影响. 水土保持学报, 2015, 29(1): 137-142.