

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0175

全小龙, 郑元铭, 段中华, 陈梦词, 乔有明, 梁军, 张杰雪, 李希来. 青海河曲草地土壤全硫及主要养分分布特征. 草业科学, 2020, 37(11): 2234-2242.

QUAN X L, ZHENG Y M, DUAN Z H, CHEN M C, QIAO Y M, LIANG J, ZHANG J X, LI X L. Characterizing distribution of soil total sulfur and major nutrients in Hequ grassland of Qinghai Province. Pratacultural Science, 2020, 37(11): 2234-2242.

青海河曲草地土壤全硫及主要养分分布特征

全小龙¹, 郑元铭², 段中华¹, 陈梦词¹, 乔有明¹, 梁 军², 张杰雪², 李希来²

(1. 青海大学省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 青海 西宁 810016; 2. 青海大学农牧学院, 青海 西宁 810016)

摘要: 硫是动植物生长和发育不可或缺的重要矿质营养元素, 对发展有机畜牧业具有重要作用。为了解青海河曲草地不同类型和空间土壤全硫及氮磷钾养分的分布特征, 探讨土壤全硫和其他养分之间的关系, 本研究采用电感耦合等离子发射光谱仪 ICP-OES (iCAP 6300) 分析了土壤和植物样品的全硫含量, 并测定了土壤全氮、全磷、全钾、有机质含量和 pH。结果表明, 不同类型草甸的土壤以及植物之间含硫量有显著差异 ($P < 0.05$), 但不同空间草甸土壤及植物之间含硫量无显著差异 ($P > 0.05$)。研究区土壤全硫平均含量 $1\ 023.98\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 植物全硫平均含量 $4\ 120.20\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。土壤有机质、全氮、全磷、全钾平均含量依次为 134.35 、 6.44 、 1.95 和 $23.05\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 高于青藏高原土壤养分含量平均水平; 土壤全硫含量与有机质含量、地上生物量和植物硫含量呈显著正相关关系 ($P < 0.05$); 土壤碳硫比 (C:S) 介于 $58.90\sim 102.18$, 研究区土壤处于硫的净释放阶段。由此可见, 青海省河南县目前的生产方式未造成土壤硫的缺乏, 硫不是该县土壤养分和畜牧业生产的限制因素。

关键词: 土壤硫; 植物硫; 黄河源区; 碳硫比; 矿质元素; 有机畜牧业; 退化草甸

文献标志码: A 文章编号: 1001-0629(2020)11-2234-09

Characterizing distribution of soil total sulfur and major nutrients in Hequ grassland of Qinghai Province

QUAN Xiaolong¹, ZHENG Yuanming², DUAN Zhonghua¹, CHEN Mengci¹, QIAO Youming¹,
LIANG Jun², ZHANG Jiexue², LI Xilai²

(1. State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xining 810016, Qinghai, China;

2. College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016, Qinghai, China)

Abstract: Sulfur is an indispensable mineral nutrient element, which required for the growth and development in animals and plants, and plays an important role in organic husbandry. The purpose of this study was to characterize the distribution of soil total sulfur, nitrogen, phosphorus, and potassium nutrients in different meadow types and topographies, and to explore the relationships between soil total sulfur and other nutrients in Hequ grassland of Qinghai, China. The total sulfur content of soil and plant samples was analyzed by ICP-OES (iCAP6300), and the contents of total nitrogen, phosphorus, potassium, organic matter, and soil pH were determined by conventional soil nutrient analysis. There were significant differences in the sulfur content in both soil and plant samples from different meadows, but no significant differences were detected in both soil and plant samples from different terrains. The soil total sulfur content in the study area was $1\ 023.98\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, and plant total sulfur content was $4\ 120.20\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. The average soil organic matter, total nitrogen, total phosphorus, and total potassium

收稿日期: 2020-04-07 接受日期: 2020-08-21

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFC0504803); 国家自然科学基金 (31760691); 高等学校学科创新引智计划 (D18013)

第一作者: 全小龙 (1988-), 男, 甘肃天水人, 在读博士生, 主要研究方向为草地生态保护与修复。E-mail: quanxl@126.com

通信作者: 乔有明 (1963-), 男, 内蒙古乌审旗人, 教授, 博士, 主要研究方向为草地生态保护与修复。E-mail: ymqiao@aliyun.com

contents were 134.35, 6.44, 1.95, and 23.05 g·kg⁻¹, respectively, and were higher than the average levels of these in the Qinghai-Tibet Plateau. Soil total sulfur content was positively correlated with organic matter content, aboveground biomass, and plant total sulfur ($P < 0.05$). Soil carbon : sulfur ratio was between 58.90 and 102.18, indicating that soil sulfur was in a net release phase. The current production mode that the element has only output and no human input has not resulted in a soil sulfur deficiency, and sulfur is not a limiting factor for soil nutrients and the livestock industry in Henan County.

Keywords: soil total sulfur; plant total sulfur; headwaters of the Yellow River; carbon sulfur ratio; mineral elements; organic husbandry; grassland degradation

Corresponding author: QIAO Youming E-mail: ymqiao@aliyun.com

硫 (S) 是植物生长发育必需的矿质营养元素, 它不仅是植物结构的重要成分, 而且参与植物体内很多重要的生化反应, 在含硫氨基酸和蛋白质的合成、光合作用、呼吸作用、脂类合成、生物固氮、糖代谢等生理过程中发挥着重要的作用^[1]。随着植物营养元素研究的持续深入, 人们对于硫素的认识不断提高, 硫已成为继氮、磷、钾之后植物所需的第四大量营养元素^[2]。土壤硫是植物生长所需硫的重要来源, 植物-土壤系统中有 95% 以上的硫素贮存于土壤中, 植物体硫主要是通过根系对土壤中硫酸根形态的硫吸收而获得^[3], 土壤硫的缺乏必然导致植物的缺硫症, 影响牧草生长发育, 降低牧草品质和畜产品质量, 进而影响人类健康^[4], 因此硫是草地生态系统土壤-牧草-畜体循环的必需元素及生态畜牧业生产中的重要限制元素^[5]。

自然土壤表层的硫主要来源于土壤母质和大气硫沉降, 硫含量与所处的地理环境及其输入输出有关。土壤硫的输出主要是通过淋溶、土壤侵蚀、径流、植物吸收和气体损失^[6]。土壤硫含量也受土壤 pH、微生物过程、有机质含量、含水量和温度等因素的影响^[7-8]。草地生态系统土壤硫平衡和土壤有机碳库有密切关系, 土壤有机碳含量降低, 硫含量减少; 相反, 土壤有机碳积累增加, 土壤硫含量增加^[9]。研究表明, 硫素添加可增加土壤氮的有效性、降低土壤中硝态氮的淋溶损失, 而氮素输入能显著提高不同粒级土壤团聚体有效硫的含量, 即硫素和氮素的有效性是相互促进的^[10]。在石灰性或中性土壤上, 磷可促进硫的氧化, 硫氧化所产生的酸促进了难溶性钙磷向易溶性钙磷和有效磷的转化, 可提高磷的有效性, 因此硫素对土壤磷具有活化作用^[11]。

青海省河南县是以天然草地放牧为主的畜牧业县, 境内没有大规模资源开发和工业废弃物污染, 也不允许大规模使用农药化肥^[12]。与三江源区的其

他地方自然条件相比, 河南县草地的水热条件较好, 产草量高, 是青海省的优良放牧场之一, 也是青海省的有机畜牧业基地。该区天然草地土壤中的硫、氮、磷、钾等养分除了母质同化、大气沉降外, 只有输出没有人为输入, 草地土壤硫含量及分布情况尚不清楚, 且现行生产方式下, 长期的畜产品输出是否会造成土壤硫的缺乏, 亦未见相关研究报道。鉴于此, 本研究选择河南县冬春和夏秋天然草地, 研究分析了该地区土壤全硫含量、土壤有机质等土壤理化指标, 探讨土壤全硫含量分布特征及与其他因素的关系, 为制定合理的草原管理制度、促进该地区生态畜牧业健康发展和生态保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

青海河曲草地位于青海省东南部黄南藏族自治州河南蒙古族自治县 (30°04′ - 34°55′ N, 100°53′ - 102°15′ E) 境内, 属于典型的高寒草甸型草地, 以山地草原化草甸为主, 同时有金露梅 (*Potentilla fruticosa*) 灌丛草甸和西藏嵩草 (*Kobresia schoenoides*) 沼泽化草甸分布。主要土壤类型为黑钙土, 亦有部分是沼泽土。土壤中有有机质含量丰富, 土壤潜在肥力高。平均海拔 3 650 m, 受季风影响强烈, 为高原大陆性气候, 属高原亚寒带湿润气候区。四季不分明, 年均气温 0℃, 无绝对无霜期; 5 月-10 月温暖、多雨, 年均降水量 521 mm, 约占全年降水量的 90%; 年均相对湿度 65%; 全年日照时数 3 242 h, 占可日照时数的 73%^[13]。

1.2 样品采集与分析

1.2.1 样品采集

2016 年 8 月在该县的冬春放牧场上进行样品采集, 采样时家畜已转场至夏秋放牧场; 2017 年 8 月

采集夏秋放牧场样品, 采样时有家畜放牧。采样点分布于河南县优干宁镇(含托叶玛)、宁木特乡、赛尔龙乡、柯生乡和多松乡, 覆盖全县不同类型天然草地。按照不同类型和不同空间分别采集灌丛草甸、沼泽化草甸和山地草原化草甸以及平滩、阳坡、阴坡的样品(表 1)。在每个样地拉一条 50 m 的样线, 坡地布置样线与坡向一致, 并尽量覆盖更多的植物。沿着样线等距确定 3 个样方 (0.5 m × 0.5 m), 将每个样方

内所有植物与地面齐平剪下(灌丛草甸剪下所有草本和灌木当年枝叶), 称量鲜重后装袋带回室内烘干测定干重。沿样线用土钻等距取 15 钻土样, 土钻深度为 7.5 cm, 将 15 钻土壤混匀除去砾石、植物残体和根系后, 用四分法留取 1 kg 左右土样装于自封袋中带回实验。烘干植物样品和自然风干土壤样品, 经研磨粉碎, 过 0.154 mm 孔径筛后, 分装备用。采样点位置利用 GPS 定位, 具体坐标如图 1 所示。

表 1 不同类型和空间草甸采样点概况
Table 1 Status of sampling sites in different meadow types

类型 Type	样地数 Sample	优势种 Dominant species	次优势种 Subdominant species	伴生种 Associated species
灌丛草甸 Shrub meadow	12	金露梅 <i>Potentilla fruticosa</i>	鹅绒委陵菜 <i>Potentilla anserina</i>	矮嵩草 <i>Kobresia humulis</i> 、瓣蕊唐松草 <i>Thalictrum petaloideum</i> 、高原毛茛 <i>Ranunculus tanguticus</i> 、黄帚橐吾 <i>Ligularia virgaurea</i> 等etc.
沼泽化草甸 Marsh meadow	12	西藏嵩草 <i>Kobresia schoenoides</i>	青藏苔草 <i>Carex moorcroftii</i>	鹅绒委陵菜 <i>Potentilla anserina</i> 、冷地早熟禾 <i>Poa crimophylla</i> 、黄花棘豆 <i>Oxytropis ochrocephala</i> 、麻花丸 <i>Gentiana straminea</i> 等etc.
山地草原化草甸 Upland meadow	20	小嵩草 <i>Kobresia pygmaea</i>	冷地早熟禾 <i>Poa crimophylla</i>	垂穗披碱草 <i>Elymus nutans</i> 、青藏苔草 <i>Carex moorcroftii</i> 、鹅绒委陵菜 <i>Potentilla anserina</i> 、矮嵩草 <i>Kobresia humulis</i> 等etc.
平滩草甸 Flat meadow	20	青藏苔草 <i>Carex moorcroftii</i>	鹅绒委陵菜 <i>Potentilla anserina</i>	线叶龙胆 <i>Gentiana farreri</i> 、南山嵩 <i>Artemisia nanschanica</i> 、云生毛茛 <i>Ranunculus longicaulis</i> 、冷地早熟禾 <i>Poa crimophylla</i> 等etc.
阳坡草甸 Sunny slope meadow	10	冷地早熟禾 <i>Poa crimophylla</i>	垂穗披碱草 <i>Elymus nutans</i>	鹅绒委陵菜 <i>Potentilla anserina</i> 、肉果草 <i>Lancea tibetica</i> 、小嵩草 <i>Kobresia pygmaea</i> 、黄帚橐吾 <i>Ligularia virgaurea</i> 等etc.
阴坡草甸 Shady slope meadow	10	冷地早熟禾 <i>Poa crimophylla</i>	小嵩草 <i>Kobresia pygmaea</i>	鹅绒委陵菜 <i>Potentilla anserina</i> 、甘肃马先蒿 <i>Pedicularis kansuensis</i> 、高原毛茛 <i>Ranunculus tanguticus</i> 、金露梅 <i>Potentilla fruticosa</i> 等etc.

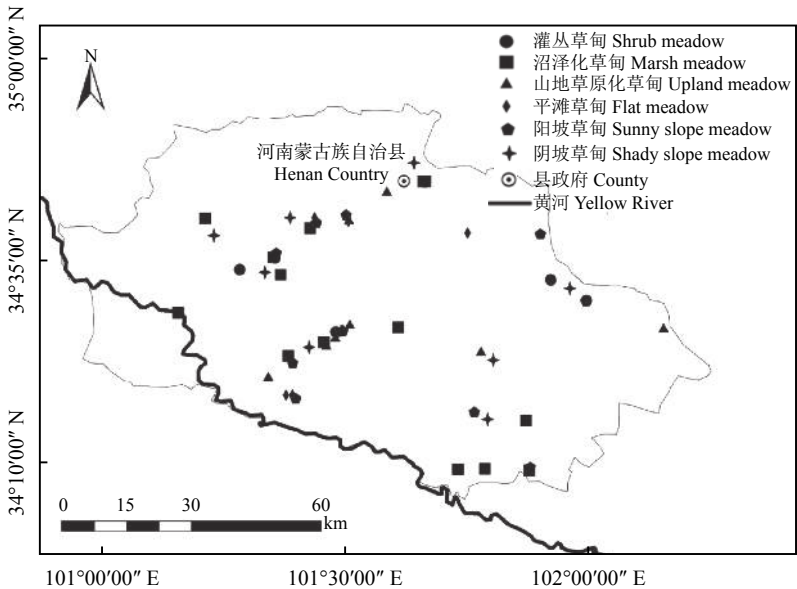


图 1 采样点位置示意图

Figure 1 Sampling location

1.2.2 样品分析及数据处理
用凯氏定氮法测定; 全磷采用碱熔钼锑抗比色法; 土壤有机质测定采用重铬酸钾容量法; 全氮采 全钾采用火焰光度法^[14]; 全硫含量采用电感耦合等

离子体质谱仪 (ICP-OES) 进行测定; 土壤有效氮、有效磷和有效钾的含量使用全自动间断化学分析仪 (ADA) 进行测定; 土壤含水量的测定采用质量分析法; 土壤 pH 采用 pH 计 (梅特勒 FE28-Standard) 测定。

首先按照表 1 所述的类型将试验数据进行归类, 然后使用 Excel 2016 进行初步处理, 通过 SPSS 17.0 软件进行统计分析和相关性分析, 结果用平均值和标准偏差表示。显著性检验采用单因子方差分析 (One-way ANOVA) 的最小显著差异法 (LSD) 的多重比较 ($\alpha = 0.05$), 运用 Pearson 相关分析进行养分含量之间的相关性分析。

2 结果与分析

2.1 草地全硫、地上生物量及土壤有机质分布

2.1.1 不同类型草地全硫、地上生物量及土壤有机质分布

沼泽化草甸土壤为弱碱性, 其他类型为弱酸性

(表 2)。沼泽化草甸中土壤和植物全硫、土壤有机质含量及地上生物量均高于其他类型, 灌丛草甸同沼泽化草甸和山地草原化草甸各值均存在显著差异 ($P < 0.05$)。土壤全硫和地上植被全硫变化趋势一致, 沼泽化草甸 > 山地草原化草甸 > 灌丛草甸; 灌丛草甸、沼泽化草甸和山地草原化草甸植物全硫与土壤全硫比值依次为 4.23、3.95 和 3.93。

2.1.2 不同空间草地全硫、地上生物量及土壤有机质分布

不同空间草地土壤均为弱酸性 (表 3), 平滩草甸 (6.64) > 阳坡草甸 (6.56) > 阴坡草甸 (6.34)。3 类空间植物全硫含量差异不显著 ($P > 0.05$), 植物和土壤全硫比阳坡草甸 (4.12) > 平滩草甸 (4.08) > 阴坡草甸 (3.75)。平滩草甸和阳坡草甸地上生物量、土壤全硫差异不显著 ($P > 0.05$)。阳坡草甸有机质含量最低, 仅为 $105.22 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 且与平滩和阴坡草甸差异显著 ($P < 0.05$)。

表 2 不同类型草甸硫素及有机质含量
Table 2 Soil sulfur and organic matter content in different meadow types

指标 Parameter	灌丛草甸 Shrub meadow	沼泽化草甸 Marsh meadow	山地草原化草甸 Upland meadow
地上生物量 Aboveground biomass/($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	218.78 ± 49.04b	235.62 ± 50.72a	231.50 ± 61.08a
土壤有机质 Soil organic matter/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	161.37 ± 52.11b	180.56 ± 64.67a	110.47 ± 26.63c
植物全硫 Plant total sulfur (PTS)/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	3 928.10 ± 204.80c	4 388.53 ± 130.73a	4 053.45 ± 193.56b
土壤全硫 Soil total sulfur (STS)/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	916.06 ± 191.45c	1 110.14 ± 270.41a	1 031.23 ± 176.77b
植物全硫: 土壤全硫 PTS: STS	4.23 ± 0.78a	3.95 ± 0.74b	3.93 ± 0.51b
pH	6.30 ± 0.38b	7.29 ± 0.39a	6.41 ± 0.54b

同行不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$); 表 3 同。

Different lowercase letters in the same row indicate significant difference at the 0.05 level; this is applicable for the Table 3 as well.

表 3 不同地形空间草甸硫素及有机质含量
Table 3 Soil sulfur and organic matter content in different topographies

指标 Parameter	平滩草甸 Flat meadow	阳坡草甸 Sunny slope meadow	阴坡草甸 Shady slope meadow
地上生物量 Aboveground biomass/($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	234.03 ± 56.21a	244.96 ± 65.68a	198.89 ± 48.71b
土壤有机质 Soil organic matter/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	145.84 ± 47.31a	105.22 ± 23.72c	126.59 ± 31.02b
植物全硫 Plant total sulfur (PTS)/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	4 185.78 ± 183.73a	4 117.04 ± 167.11a	4 048.30 ± 231.15a
土壤全硫 Soil total sulfur (STS)/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	1 016.41 ± 215.56b	1 008.41 ± 211.07b	1 078.24 ± 143.27a
植物全硫: 土壤全硫 PTS: STS	4.08 ± 0.66a	4.12 ± 0.70a	3.75 ± 0.42b
pH	6.64 ± 0.45a	6.56 ± 0.57a	6.34 ± 0.49a

2.2 草地土壤主要养分分布

2.2.1 不同类型草地土壤主要养分分布

不同类型草地土壤全氮含量灌丛草甸 > 沼泽化

草甸 > 山地草原化草甸, 灌丛草甸显著高于山地草原化草甸和沼泽化草甸间 ($P < 0.05$) (表 4)。不同类型草地土壤中有效氮含量变化趋势及显著性差异

同土壤全氮一致(表 5)。沼泽化草甸土壤全磷、全钾、有效钾含量最低,且与其他类型差异显著($P < 0.05$)。有效磷含量山地草原化草甸 > 沼泽化草甸 > 灌丛草甸,但三者间显著不差异($P > 0.05$)。

表 4 不同类型和空间草甸土壤全养分分布特征
Table 4 Distributional characteristics of soil total nutrient in different type and topography meadows

项目 Item	类型 Type	全氮 TN/(mg·kg ⁻¹)	全磷 TP/(mg·kg ⁻¹)	全钾 TK/(mg·kg ⁻¹)
草甸类型 Types of meadows	灌丛草甸 Shrub meadow	8.23 ± 1.21a	2.00 ± 0.28a	21.30 ± 2.37b
	沼泽化草甸 Marsh meadow	6.01 ± 1.16b	1.77 ± 0.37b	20.04 ± 2.78b
	山地草原化草甸 Upland meadow	5.98 ± 1.19b	2.00 ± 0.25a	24.64 ± 1.51a
空间分布 Topography of meadows	平滩草甸 Flat meadow	6.54 ± 1.09b	1.92 ± 0.32a	21.99 ± 2.16b
	阳坡草甸 Sunny slope meadow	5.83 ± 1.12c	1.97 ± 0.28a	25.02 ± 1.46a
	阴坡草甸 Shady slope meadow	6.75 ± 1.53a	2.03 ± 0.18a	24.30 ± 1.74a

同列不同小写字母表示不同草甸类型或地形空间之间差异显著($P < 0.05$); 下表同。
Different lowercase letters in the same column indicate significant difference between the different meadow types or the different topographies at the 0.05 level; TN, total nitrogen; TP, total phosphorus; TK, total potassium; this is applicable for the following tables as well.

表 5 不同类型和空间草甸土壤有效养分特征分布
Table 5 Soil available nutrients in different type and topography meadows

项目 Item	类型 Type	有效氮 AN/(mg·kg ⁻¹)	有效磷 AP/(mg·kg ⁻¹)	有效钾 AK/(mg·kg ⁻¹)
草甸类型 Types of meadows	灌丛草甸 Shrub meadow	512.00 ± 68.66a	12.65 ± 3.26a	274.23 ± 36.34b
	沼泽化草甸 Marsh meadow	414.87 ± 78.80b	13.19 ± 3.38a	211.36 ± 48.31c
	山地草原化草甸 Upland meadow	406.32 ± 59.47b	13.89 ± 3.26a	335.05 ± 61.13a
空间分布 Topography of meadows	平滩草甸 Flat meadow	446.99 ± 71.80a	13.41 ± 3.25b	287.21 ± 50.79b
	阳坡草甸 Sunny slope meadow	373.46 ± 63.46c	12.76 ± 3.86b	352.83 ± 54.54a
	阴坡草甸 Shady slope meadow	431.39 ± 47.02b	14.52 ± 2.82a	276.28 ± 61.13b

AN, available nitrogen; AP, available phosphorus; AK, available potassium.

2.2.2 不同地形空间草地土壤主要养分分布

不同空间草地土壤全氮和有效氮、全钾和有效钾变化趋势相似,阳坡草甸土壤全氮和有效氮含量最低,而全钾和有效钾含量高于平滩和阴坡草甸,且有效钾含量与二者存在显著差异($P < 0.05$)(表 4、表 5)。平滩和阴坡草甸土壤中全钾含量差异显著($P < 0.05$),而有效钾含量差异不显著($P > 0.05$)。土壤全磷含量阴坡(2.03) > 阳坡(1.97) > 平滩(1.92),三者间差异不显著($P > 0.05$)。

2.3 草地土壤硫、碳、氮、磷分布特征

草地土壤硫、碳、氮、磷变化总体特征用土壤中碳素、氮素、磷素、硫素总质量的比值表示(表 6)。除 N:S 和 C:P 外,灌丛草甸与沼泽化草甸的 N:P、C:S 和 C:N 均无显著性差异($P > 0.05$),但灌丛草甸的 N:P、N:S、C:S 及 C:P 均显著高于山地草原化草甸($P < 0.05$);山地草原化草甸的 C:N 和 C:P 显著低于沼泽化草甸的($P < 0.05$),而两者的 N:P、N:S 和

C:S 无显著差异($P > 0.05$)。

不同地形空间草地土壤中,平滩草甸 C:N 和 C:P 显著高于阳坡和阴坡草甸的($P < 0.05$);平滩、阳坡和阴坡草甸 N:P、N:S 无显著差异($P > 0.05$);平滩草甸 C:S 显著高于阳坡草甸($P > 0.05$),但二者均与阴坡差异不显著($P > 0.05$)。

2.4 草地土壤全硫与其他因子的关系有机质含量

对高寒草甸土壤全硫和地上生物量、有机质含量、含水量和植物硫含量进行相关性分析(图 2)显示,土壤全硫与有机质含量、地上生物量及植物硫含量极显著相关($P < 0.01$),土壤全硫与含水量显著相关($P < 0.05$)。

2.5 土壤 4 种大量营养元素相关性分析

高寒草甸土壤硫、氮、磷、钾 4 种大量营养元素相关性分析如表 7 所列。研究区域内草地土壤全硫与植物全硫土壤、全氮与有效氮之间表现出极显著

表 6 草地土壤硫、碳、氮、磷变化总体特征
Table 6 The ratios of C, N, P, and S in different meadows

项目 Item	类型 Type	C : N	C : P	C : S	N : P	N : S
草甸类型 Types of meadows	灌丛草甸 Shrub meadow	11.24 ± 0.61ab	48.99 ± 12.20b	101.79 ± 39.79a	4.39 ± 1.03a	8.89 ± 3.48a
	沼泽化草甸 Marsh meadow	11.58 ± 0.95a	55.55 ± 17.28a	90.70 ± 27.90ab	3.66 ± 1.42ab	5.68 ± 2.56b
	山地草原化草甸 Upland meadow	10.62 ± 0.94b	33.27 ± 7.73c	62.43 ± 13.21B	3.04 ± 0.67b	5.92 ± 0.91b
	平滩草甸 Flat meadow	13.26 ± 2.02a	45.76 ± 11.95a	84.15 ± 22.79a	3.52 ± 1.02a	6.84 ± 1.39a
空间分布 Topography of meadows	阳坡草甸 Sunny slope meadow	10.27 ± 0.53b	29.27 ± 7.72b	61.73 ± 21.40b	3.08 ± 0.87a	5.78 ± 1.77a
	阴坡草甸 Shady slope meadow	10.80 ± 0.88b	36.05 ± 8.97b	70.92 ± 9.86ab	3.44 ± 0.44a	6.54 ± 0.99a

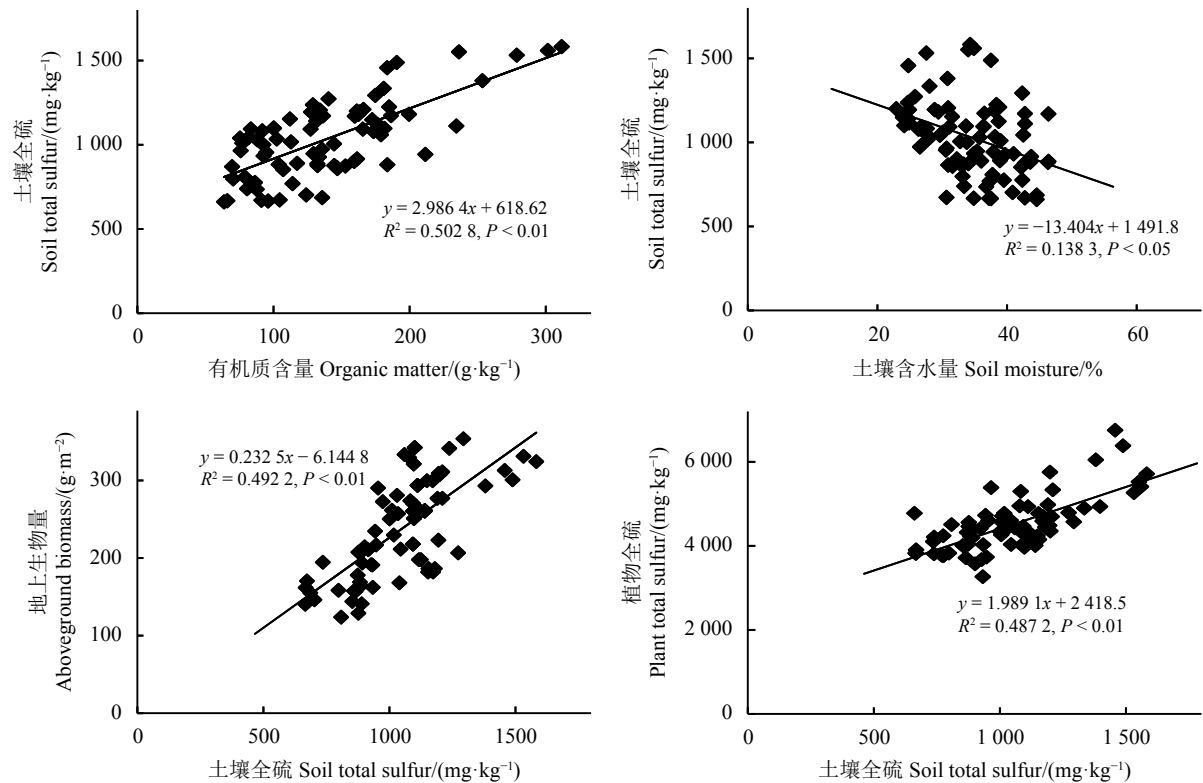


图 2 土壤全硫与有机质、含水量、地上生物量和植物全硫含量关系
Figure 2 Relationships between soil total sulfur and organic matter, water content, aboveground biomass, and plant total sulfur content

正相关关系 ($P < 0.01$)。土壤全氮与全钾、有效氮与全钾之间存在显著负相关关系 ($P < 0.05$)；植物全硫与全氮、有效氮与有效钾显著正相关 ($P < 0.05$)。土壤有效磷与全磷、全钾、有效钾显著相关 ($P < 0.05$)。除此之外，其余其他土壤养分之间的相关性不显著 ($P > 0.05$)。

3 讨论

本研究区土壤全硫均值为 1 023.98 mg·kg⁻¹，高

于北美大平原天然草地土壤的 523.5 mg·kg⁻¹^[15] 和智利火山灰天然草地土壤的 635 mg·kg⁻¹^[16]，低于东北三江平原毛果苔草 (*Carex miyabei*) 沼泽 3 175 mg·kg⁻¹^[17] 及闽江河口湿地的 1 613 mg·kg⁻¹^[18]。青藏高原不同区域天然草地土壤中全硫含量差异明显^[19]，这可能受到样地的地形地貌、气候特征和土壤条件等因素影响^[20]。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^[21]，流入西藏纳木错的河水、湖中湖水和沉积物等硫含量都较高，而

表 7 草甸土壤养分含量间的相关系数 (Pearson 相关)
Table 7 Correlation coefficients between soil nutrient contents in different meadows

指标 Parameter	全氮 TN	全磷 TP	全钾 TK	有效氮 AN	有效磷 AP	有效钾 AK	土壤全硫 STS
全磷 TP	0.325						
全钾 TK	-0.543*	0.152					
有效氮 AN	0.823**	0.299	-0.504*				
有效磷 AP	-0.350	0.623*	0.567*	-0.195			
有效钾 AK	0.179	0.168	0.342	0.657*	0.628*		
土壤全硫 STS	0.117	-0.196	0.300	-0.369	0.135	0.280	
植物全硫 PTS	0.595*	0.360	0.241	0.456	0.283	0.370	0.729**

STS, soil total sulfur; PTS, plant total sulfur; **, $P < 0.01$; *, $P < 0.05$.

硫均来源于河水流经区域的土壤^[22]。青藏高原所处地区气候温凉且较为湿润,土壤冻结期长,有利于土壤腐殖质的累积,土壤中总硫含量较高^[23],为土壤有机质矿化作用释放有效硫提供了基础。本研究显示,土壤全硫与有机质含量、地上生物量及植物硫含量呈显著正相关关系($P < 0.05$),因此作为植物生长必需的第 4 大量元素,硫能保证该地区植物的生长,增加植物地上生物量。植物中硫含量仅占干物质的 $1 \sim 5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,研究表明,禾本科牧草^[24]硫含量临界值为 $2.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,即当植物干重硫含量低于 $2.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时可认为硫缺乏,本研究中植物硫含量为 $4.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,青海省可食牧草平均硫含量^[25]为 $2.81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,因此研究区植物不缺硫素。

土壤是高寒草地生态系统维持健康的基础,青藏高原环境条件特殊,地势高、温度低、冷季长,因而土壤有机质、氮、磷和钾等土壤养分因子成为影响植物生长发育的重要因素。一般认为,草地的养分供给主要是依靠动植物及微生物残体和部分根系的分泌物,青藏高原条件的特殊性导致矿化分解速率较慢,土壤表层有机质含量高,土壤养分也多集中于土壤表层。也有研究表明,氮、磷是青藏高原高寒草甸最主要的限制因子,氮、磷在土壤中的存贮和转化受土壤有机质积累与分解制约^[26]。青藏高原土壤钾素含量高,受土壤成土母质影响,钾从土壤胶体上被代换出来,形成不易挥发的化合物,因而同一地区钾含量相对稳定^[27]。本研究土壤有机质、全氮、全磷、全钾含量均值依次为 134.67 、 6.44 、 1.95 和 $23.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,高于青藏高原整体土壤养分含量水平^[23, 26-27]。

土壤有机质、全氮、全磷和全钾反映了土壤养

分的基础,而土壤有效养分反映的是土壤发育状况,是土壤供给植物养分的能力。本研究中草地全氮、有效氮含量变化趋势一致,同土壤有机质的含量变化趋势近似。中阳坡草甸有效氮偏低,可能是受太阳直射和土壤含水量影响。沼泽化和平滩草甸中偏低可能是由于土壤通透性和微生物活性较差,有机质和全氮分解的程度低造成的。本研究中沼泽化草甸有效钾含量最低,这与在若尔盖高原沼泽^[28]上的研究结果相似,这应该与沼泽化草甸植物生长快和植被覆盖度高、有效钾吸收利用率偏高相关。

C:N 是衡量土壤氮矿化能力的重要指标,全球表层土壤 C:N 在 14.3 左右波动,高寒地区平均值为 17.20 ^[29]。研究表明,中国土壤 C:N 均值为 11 ^[30],本研究中沼泽化草甸 C:N 为 17.42 ,略高于全球高寒地区均值,其余草甸 C:N 值接近中国土壤 C:N 平均值。相较沼泽化草甸,其他草甸土壤环境更有利于微生物分解有机质释放养分,增加土壤有效氮。本研究中, C:P 均值为 40.29 ,与其他地区相比处于较低水平,造成该现象的原因可能是研究区海拔高、气温低,磷素经分解和矿化后难以迅速吸收利用。本研究中 N:P 介于 $2.68 \sim 4.12$,表现出较大的 N:P 空间变异性和植被分布的差异。

青藏高原表层土壤 C:N:S 值为 $113.03:10:1.87$ ^[19],本研究区 C:N:S 值为 $120.47:10:1.58$,表明研究区土壤碳、氮有机质矿化能力高于土壤硫。土壤 C:S 是影响土壤有机硫矿化的因子之一,即 C:S 影响着有机硫的转化方向。若 C:S 小于 200 ,则表现为有机硫在矿化过程中净释放;若 C:S 大于 400 ,则发生矿物态硫的净固定;当 C:S 大于 200 而小于 400 时,土壤中的硫素既不用来合成有机硫也不从有机硫中

释放^[31]。本研究中, C:S 均未达到 200, 这表明研究区土壤目前基本处于有机硫矿化过程中的净释放阶段, 硫素不是土壤养分限制因素。

4 结论

1) 河曲草地土壤全硫、有机质、全氮、全磷、全钾含量均高于青藏高原平均水平; C:N 接近中国平均值, 而 C:P 低于其他地区, 土壤 C:S 均小于 200,

即处于有机硫矿化过程净释放阶段。

2) 河曲草地土壤硫与有机质含量、地上生物量和植物全硫含量变化趋势一致, 与土壤水分相关性不显著; 土壤有机质矿化提高土壤硫含量, 硫含量增加能促进植物生长。

3) 河曲草地土壤硫素供应充足, 青海河南县目前的生产方式和长期的畜产品输出尚未造成土壤硫的大量流失, 硫素不会影响河南县有机畜牧业发展。

参考文献 References:

- [1] LINCOLN T, EDUARDO Z. 植物生理学 (第 5 版). 北京: 科学出版社, 2015.
LINCOLN T, EDUARDO Z. Plant Physiology (Fifth Edition). Beijing: Science Press, 2015.
- [2] STUEKE N, EVA E, CATLING D C, BUICK R. Contributions to late Archaean sulfur cycling by life on land. *Nature Geoscience*, 2012, 5(10): 722-725.
- [3] PRASAD R, SHIVAY Y S. Sulphur in soil, plant and human nutrition. *Proceedings of the National Academy of Sciences India*, 2018, 88(2): 429-434.
- [4] 李书田, 林葆, 周卫. 土壤硫素形态及其转化研究进展. *土壤通报*, 2001, 32(3): 132-135.
LIST, LIN B, ZHOU W. Review on sulfur transformation and availability in soil. *Chinese Journal of Soil Science*, 2001, 32(3): 132-135.
- [5] 刘淼, 梁正伟. 草地生态系统硫循环研究进展. *华北农学报*, 2009, 24(S2): 257-262.
LIU M, LIANG Z W. Progress on the sulfur cycle in grassland ecosystem. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2009, 24(S2): 257-262.
- [6] 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(5): 259-263.
WANG F, ZHU Y J, LU L. Sulphur in soil and its transformations. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007(5): 259-263.
- [7] CAI J P, ZHANG Y Y, ZHANG Y G, YANG S, WANG R Z, WANG Z W, WU Y N, HAN X G, JIANG Y. Contrasting pH buffering patterns in neutral-alkaline soils along a 3 600 km transect in northern China. *Biogeosciences*, 2015, 12: 7047-7056.
- [8] ZHAO C C, DEGRYSE F, GUPTA V, MCLAUGHLIN M J. Elemental sulfur oxidation in Australian cropping soils. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 79(1): 89-96.
- [9] BAILEY J S, DENG Y, SMITH R V. Changes in soil organic carbon storage under grassland as evidenced by changes in sulfur input-output budgets. *Chemosphere*, 2001, 42(2): 141-151.
- [10] WANG R Z, COURTNEY A C, WANG X, HE P, XU Z W, JIANG Y. The effects of a 9-year nitrogen and water addition on soil aggregate phosphorus and sulfur availability in a semi-arid grassland. *Ecological Indicators*, 2016, 61: 806-814.
- [11] REZAPOUR S. Effect of sulfur and composted manure on SO₄-S, P and micronutrient availability in a calcareous saline-sodic soil. *Chemistry and Ecology*, 2014, 30(2): 147-155.
- [12] 王金贵, 李希来, 李宗仁, 刘育红, 盛海彦. 青海超净区高寒草甸土壤有机碳及养分分布特征. *生态环境学报*, 2018, 27(2): 232-238.
WANG J G, LI X L, LI Z R, LIU Y H, SHENG H Y. Distribution characteristics of soil organic carbon and nutrients in alpine meadow soils in a super clean area, Qinghai Province. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(2): 232-238.
- [13] 王晓敏, 罗智勇, 李红, 盛兆权. 河南县牧草资源及优势牧草分布状况调研. *现代农业科技*, 2019, 11(1): 211-216.
WANG X M, LUO Z Y, LI H, SHENG Z Q. Investigation on forage resources and dominant forage distribution in Henan County. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2019, 11(1): 211-216.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析 (第 3 版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis (Third Edition). Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [15] WANG J, SOLOMON D, LEHMANN J, ZHANG X D, WULF A. 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): 160-172.
- [16] AGUILERA M, MORA M D L L, BORIE G, PEIRANO P, ZUNINO H. Balance and distribution of sulfur in volcanic ash-derived soils in Chile. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(9): 1350-1361.

- [17] 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.
LI R L, CHAI M W, QIU G Y, SHI F C, KAICHIRO S. Profile nutrient distribution and sedimentary characteristics in typical marshes of Sanjiang Plain. Environment Science, 2014, 35(8): 2928-2936.
- [18] 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.
ZENG C S, WANG W Q, ZHAI J H. Characteristics of wetland soil total sulfur and available sulfur distribution in different water-flooded frequency In Minjiang River Estuary. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(6): 246-250.
- [19] 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): 7919-7928.
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): 7919-7928.
- [20] 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.
- [21] GOLDBERGER M B. Sulfur-rich Sediments. Treatise on Geochemistry, 2003, 407(7): 257-288.
- [22] KASPER T, FRENZEL P, HABERZETTL T, SCHWARZ A, DAUT G, MESCHNER S, WANG J B, ZHU L P, MAUSBACHER R. Interplay between redox conditions and hydrological changes in sediments from Lake Nam Co (Tibetan Plateau) during the past 4000 cal BP inferred from geochemical and micropaleontological analyses. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 2013, 392: 261-271.
- [23] 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.
XIE Q Y, GAO Y H. The effects of freezing-thawing on soil carbon, nitrogen and phosphorus availabilities in alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(1): 137-142.
- [24] 陈国安. 土壤与植物的缺硫诊断. 土壤学进展, 1983(3): 11-16.
CHEN G A. Diagnosis of sulfur deficiency in soil and plants. Progress in Soil Science, 1983(3): 11-16.
- [25] 张力, 刘彩琴, 郑中朝, 周学辉, 肖西山, 焦婷, 冯瑞林, 李伟, 苗小林. 青海三角城种羊场高寒草甸草场氮、硫的季节变化及其盈亏分析. 中国草食动物, 2004(4): 18-20.
ZHANG L, LIU C Q, ZHENG Z C, ZHOU X H, XIAO X S, JIAO T, FENG R L, LI W, MIAO X L. The seasonal variation and lack analysis of N and S in alpine meadow in Qinghai Sanjiaocheng farm. China Herbivore Science, 2004(4): 18-20.
- [26] 赵云, 陈伟, 李春鸣, 陈建纲, 张德罡. 东祁连山不同退化程度高寒草甸土壤有机质含量及其与主要养分的关系. [草业科学](#), 2009, 26(5): 20-25.
ZHAO Y, CHEN W, LI C M, CHEN J G, ZHANG D G. Content of soil organic matter and its relationships with main nutrients on degraded alpine meadow in Eastern Qilian Mountains. [Pratacultural Science](#), 2009, 26(5): 20-25.
- [27] 苏振声, 孙永芳, 付娟娟, 褚希彤, 许岳飞, 呼天明. 不同放牧强度下西藏高山嵩草草甸土壤养分的变化. [草业科学](#), 2015, 32(3): 322-328.
SU Z S, SUN Y F, FU J J, CHU X T, XU Y F, HU T M. Effects of grazing intensity on soil nutrient of *Kobresia pygmaea* meadow in Tibet Plateau. [Pratacultural Science](#), 2015, 32(3): 322-328.
- [28] 李珂, 杨永兴, 杨杨, 韩大勇. 基于植被数量分类的排水疏干影响下若尔盖高原沼泽退化特征. 应用生态学报, 2012, 23(7): 1781-1789.
LI K, YANG Y X, YANG Y, HAN D Y. Degradation characteristics of swamps in Zoige Plateau induced by drainage based on quantitative classification of vegetation. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(7): 1781-1789.
- [29] POST W M, EMANUEL W R, ZINKE P J, STANGENBERGER A G. Soil carbon pools and world life zones. [Nature](#), 1982, 298: 156-159.
- [30] LIU J X, FANG X, TANG X L, ANG W T, ZHOU G Y, XU S, HUANG W J, WANG G X, YAN J H, MA K P, DU S, LI S G, HAN S J, MA Y X. Patterns and controlling factors of plant nitrogen and phosphorus stoichiometry across China's forests. [Biogeochemistry](#), 2019, 143(2): 191-205.
- [31] 农业大词典编辑委员会. 农业大词典. 北京: 中国农业出版社, 1998.
Editorial Board of Agricultural Dictionary. Agricultural Dictionary. Beijing: China Agriculture Press, 1998.

(责任编辑 魏晓燕)