

罗曼琳, 窦添元, 向秋洁, 等. 重庆农田土壤硫分布特征及其影响因素[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(3): 287-297.

LUO Man-lin, DOU Tian-yuan, XIANG Qiu-jie, et al. Distribution characteristics and influencing factors of soil sulphur in Chongqing farmlands[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(3): 287-297.

重庆农田土壤硫分布特征及其影响因素

罗曼琳^{1,2}, 窦添元^{1,2}, 向秋洁^{1,2}, 胡翔宇^{1,2}, 木志坚^{1,2,3*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 2. 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400716; 3. 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715)

摘要:为研究不同环境要素作用下重庆农田土壤硫分布特征及其与环境因素的关系,结合野外调查和室内分析,研究了重庆农田土壤全硫的分布特征及其与土壤剖面深度、土壤类型、地形、土地利用方式、土壤pH和有机质之间的关系。结果表明,表层土壤全硫的平均值为 $262\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,处于我国土壤硫平均水平,高于作物缺硫临界值 $150\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。全硫含量空间分布在水平方向上呈现渝西、渝东北大于渝东南、渝中的趋势;在垂直方向上,呈现出自上而下逐渐降低的分布特征。全硫含量在不同土壤类型中表现为黄棕壤土最高、潮土最低,在不同地形条件下表现为中山最高、台地最低,在不同土地利用方式下则表现为未开垦农地最高、旱地最低。土壤全硫含量与pH对数呈显著负相关($P<0.01$),与有机质含量对数呈显著正相关($P<0.01$)。多元线性逐步回归分析表明,土壤类型和有机质含量是影响土壤全硫含量分布的主要因素,pH、地形、土地利用方式是次要因素。

关键词:重庆市;全硫;分布特征;剖面深度;土壤类型;地形;土地利用方式

中图分类号:S153

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2019)03-0287-11

doi: 10.13254/j.jare.2018.0306

Distribution characteristics and influencing factors of soil sulphur in Chongqing farmlands

LUO Man-lin^{1,2}, DOU Tian-yuan^{1,2}, XIANG Qiu-jie^{1,2}, HU Xiang-yu^{1,2}, MU Zhi-jian^{1,2,3*}

(1. College of Resource & Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400716, China; 3. Key Laboratory of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Chongqing 400715, China)

Abstract: Exploring the distribution characteristics of soil sulfur under different environments and its relationship with environmental factors is important for the comprehensive and accurate assessment of soil sulfur status and the soil sulfur cycle in Chongqing farmlands. In this study, we characterized the relationship of total sulfur in Chongqing's farmland soils with soil depth, soil type, topography, land use pattern, soil pH and organic matter using field investigations and indoor analysis. We found that the total sulfur content of surface soil was an average of $262\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, which was the average level of soil sulfur in China. It was higher than the critical value of crop sulfur deficiency of $150\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. In a horizontal direction, the total sulfur content of west and northeast Chongqing was greater than that of the southeast and the middle of Chongqing. In a vertical direction, sulfur was a decreasing feature from top to bottom. The sulfur content reached the highest levels in yellow brown soil and the lowest levels in tidal soil. Under different terrain, the total sulfur content was the highest in the middle mountains, and the lowest in the terraces. In terms of different land use modes, the total sulfur content was highest in uncultivated agricultural land and lowest in dry land. There was a significant negative correlation ($P<0.01$) between total soil sulfur content and the pH logarithm, and a significant positive correlation ($P<0.01$) with the logarithm of organic matter content. A multivariate linear stepwise regression analysis showed that soil type and organic matter content were the primary factors affecting the distribution of total sulfur content in soil while pH, topography and land use patterns were the secondary factors.

Keywords: Chongqing; total sulfur; distribution characteristics; profile depth; soil types; topography; land use patterns

收稿日期:2018-11-06 录用日期:2019-02-20

作者简介:罗曼琳(1993—),女,四川广元人,硕士研究生,研究方向为土壤环境保护。E-mail:626170409@qq.com

*通信作者:木志坚 E-mail:muzj@swu.edu

基金项目:国家自然科学基金项目(41371211)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41371211)

硫作为植物继氮、磷、钾之后的第四位营养元素,在其生长发育和代谢过程中具有重要的作用,如参与蛋白质和叶绿素形成、控制光合作用中碳水化合物代谢、影响植物呼吸作用等^[1-2]。硫也对维持植物生态系统健康发展有着重要意义,如缺硫会导致代谢紊乱,生长发育受阻等^[3]。硫通过酸沉降、母质同化、含硫化肥输入等途径进入土壤^[4],但近年来随着大气硫污染减少、单位面积产量及复种指数提高和低硫化肥的应用,投入土壤的硫素逐渐减少^[5],这导致我国许多省份土壤出现了缺硫现象^[6]。水稻缺硫时植株矮小,返青慢,玉米缺硫时全株呈黄绿色,土豆缺硫时生长缓慢,叶片黄化。硫也是生物地球化学循环的重要元素之一,其生物地球化学过程在土壤生态系统中起着重要作用^[7],如硫酸盐的还原作用是土壤环境中最重要的有机质降解途径,含硫化合物和硫酸盐在厌氧条件下通过同化有机物获得能量,同时产生CO₂、H₂S^[8],H₂S与土壤重金属作用生成金属硫化物,降低重金属对土壤环境的损害^[9]。

重庆是重要的工业基地,工业能源消耗巨大,且能源消耗以高硫煤为主,高硫煤的使用导致以SO₂为主的硫化物大量排入空气。重庆境内地貌类型以山地为主,且具有风速小、气温高、雾日多等气候特征,使大气污染物难以向外扩散。重庆由于特殊的能源结构、地理及气象条件,成为我国酸雨重灾区之一^[10]。酸雨进入土壤环境,使土壤pH值和盐基饱和度降低,SO₄²⁻会携带土壤中一定量的阳离子,导致土壤养分以及盐基离子的淋失^[11],SO₄²⁻也会促进土壤释放重金属,增加土壤重金属污染的风险^[12],但酸雨同时也能够增加土壤硫素含量。近年来随着大气污染防治措施的实施,酸雨现象得到遏制,大气质量也得到明显改善,但对重庆农田土壤硫素现状的相关研究鲜见报道。

目前,国内外有关硫在土壤中的分布特征的研究主要集中于水稻田^[13-15]、湿地^[16-18]、红树林^[19]、三江平原沼泽^[20-21]和闽江河口^[22]。针对土壤硫分布的主要影响因素的研究较少,有限的研究集中于土壤质地^[7]、有机质^[23-25]、pH值^[22,26]、盐度^[19,27]、植被^[23,28]、人类活动^[7]对土壤硫分布的影响。为了便于比较,研究者往往选取单一的环境因素作为研究对象,而在多种环境因素共存条件下开展的研究较少。

本文以重庆渝西、渝东北、渝东南和渝中地区为研究对象,研究区域内土壤类型多样,地形复杂,土地利用方式多变,pH值和有机质含量变异性较大,这些因素共同影响着土壤全硫的分布。因此,要对该区土

壤全硫状况进行全面准确的评估,必须研究不同环境因素共同作用下的土壤全硫的分布特征。本文在研究区域内选择了不同土壤类型、地形和土地利用方式,分析了农田土壤全硫与这些环境因素的关系,以期为重慶农田土壤硫素的系统研究提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

采样区域包括渝西地区(北碚、合川、璧山、潼南、铜梁、大足、荣昌、永川、江津、綦江、南川)、渝东北地区(垫江、忠县、梁平、万州、开县、奉节、巫山、巫溪、城口)、渝东南地区(丰都、石柱、武隆、彭水、秀山、酉阳)和渝中地区(沙坪坝、九龙坡、渝北、巴南、长寿、涪陵)。采样地区位于105°21'25"~109°53'33"E,20°44'28"~31°59'03"N,海拔170~2410 m。采样点土壤类型包括潮土、黄壤土、黄棕壤土、石灰岩土、水稻土和紫色土,地貌类型以中山(海拔1000~3500 m)、低山(海拔500~1000 m)、丘陵(海拔200~500 m)和台地(海拔≤200 m)为主^[29],土地利用方式有林地、旱地、水田和未开垦农地,研究区土壤pH值范围为3.8~8.3,有机质含量范围为2.72~53.50 g·kg⁻¹。

1.2 样品采集与分析

采样点的确定主要是利用地形图和土壤图作为底图,参考全国第二次土壤普查的资料,既兼顾土壤类型,又充分考虑地貌类型、土地利用方式的差异,力求使采集的样本具有较好的代表性。采样原则按照“随机、等量、多点混合”进行,采用S形布点法。共选择182个采样点,各点分别采集表层(0~20 cm)、中层(20~40 cm)及下层(40~60 cm)土样,共采集剖面样品546个。样品经自然风干,去除细根及杂质后,用研磨器研磨,过100目筛。土壤全硫含量利用元素分析仪(Elementar Vario PyroCube)测定;土壤pH值用复合电极法(水:土=2.5:1)测定;有机质采用重铬酸钾-FeSO₄滴定法测定。采样点位置利用GPS定位,见图1。

1.3 数据处理与统计

实验数据采用Microsoft Excel 2010进行整理,运用Origin 2015软件对数据进行作图,采用SPSS 22.0软件对不同环境因素下的全硫含量进行单因素方差分析,并对影响全硫含量的环境因素进行多元线性逐步回归分析,显著性水平设定为 $\alpha=0.05$,利用ArcGIS 10.2绘制采样点分布图以及对土壤全硫含量进行地统计学分析,采用Kriging插值法绘制土壤全硫空间

看出,重庆农田土壤全硫含量分布总体上呈现渝西、渝东北大于渝东南、渝中的趋势。本研究将土壤全硫含量共分6个等级:1级(350~415 mg·kg⁻¹)、2级(250~350 mg·kg⁻¹)、3级(200~250 mg·kg⁻¹)、4级(150~200 mg·kg⁻¹)、5级(100~150 mg·kg⁻¹)和6级(50~100 mg·kg⁻¹)。在表层土壤中1级水平所占面积为166.189 km²,仅占全市总面积的0.20%,主要位于綦江中部和城口东南部;2级水平所占面积为30 891.61 km²,约占全市总面积的37.48%,主要位于北碚、巫溪、巫山、璧山、九龙坡、渝北、沙坪坝、綦江、彭水、城口、武隆东

部、酉阳东部、秀山东北部、开县东北部、云阳西北部、铜梁东南部和南川西南部等;3级水平所占面积为29 073.31 km²,约占全市总面积的35.28%,主要位于荣昌、永川、江津、奉节、巴南、南岸、江北、黔江、南川北部、武隆中部、酉阳西部、秀山南部、云阳东部、潼南西南部和铜梁西北部;4级水平所占面积为16 759.03 km²,约占全市总面积的16.69%,主要位于合川、长寿、涪陵、石柱、忠县、梁平东部、万州西部和开县西南部;5级水平所占面积为4 535.98 km²,约占全市总面积的5.50%,主要位于垫江、丰都东部、石柱西南部、

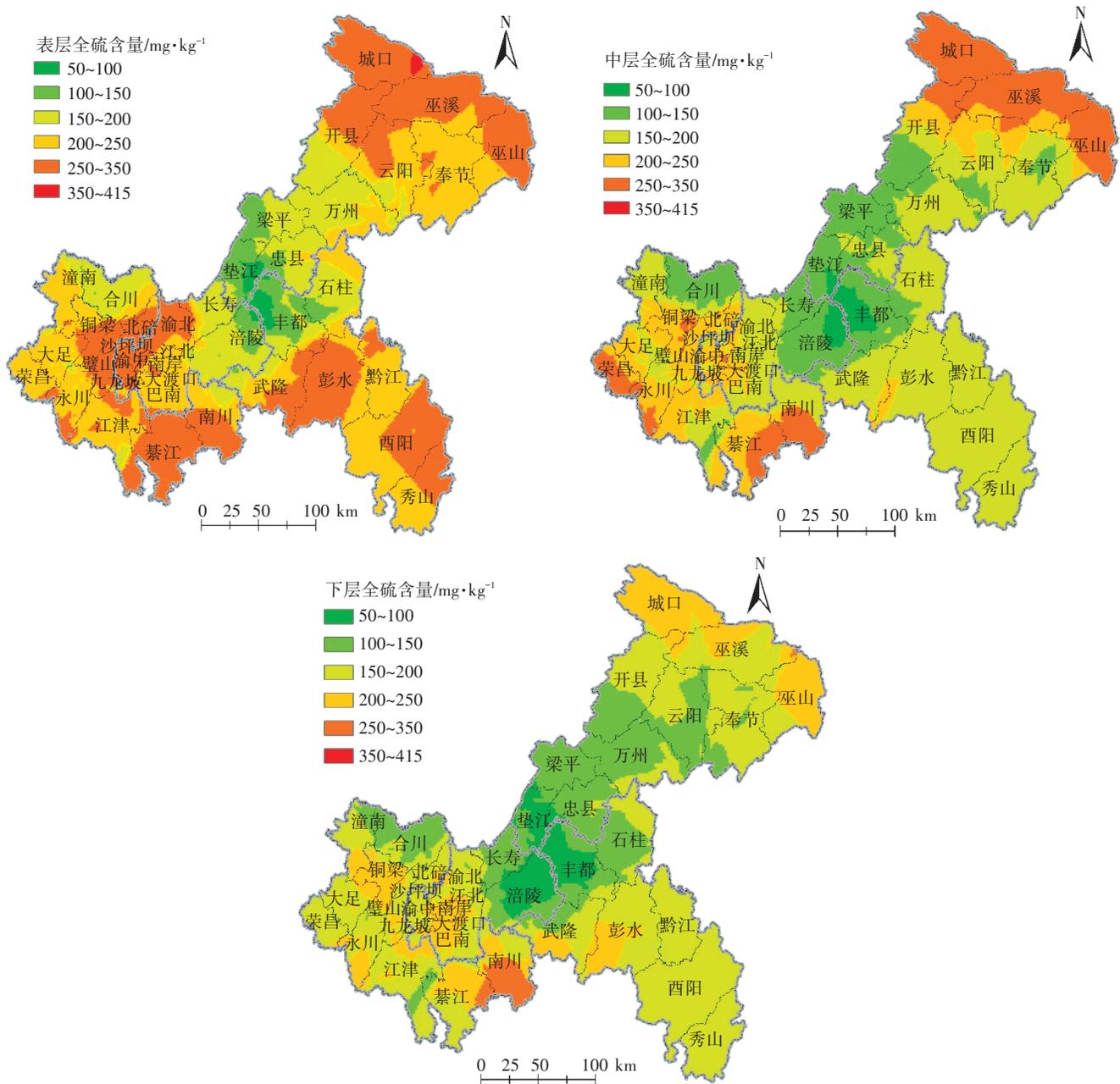


图2 重庆农田土壤全硫空间分布

Figure 2 Spatial distribution of total sulfur in farmland soil in Chongqing

忠县西南部、梁平西部以及涪陵东北部;6级水平所占面积为990.62 km²,仅占全市总面积的1.21%,主要分布于垫江东南部和丰都西北部。

2.3 土壤硫剖面分布特征

由表1和图2均可看出,渝西、渝东北、渝东南和渝中地区剖面中的全硫含量顺序为表层>中层>下层。统计检验结果表明,渝西地区不同土层深度之间的全硫含量存在显著差异($P<0.05$),渝东北、渝东南和渝中地区则在 $P<0.01$ 水平上存在显著差异。

由于不同地区的土壤全硫含量与土层深度之间存在显著的线性关系($P<0.05$),因此可以通过分析全硫含量与土层深度之间线性关系的变化,来解释不同地区全硫受环境影响程度的大小。对于线性关系而言,因变量与自变量的斜率和截距能够很好地反映线性关系的变化,不同地区全硫含量与土层深度线性关系的斜率和截距见表2。

不同地区全硫含量和土层深度之间线性关系的斜率表现为渝东南最高,渝东北、渝中较高,渝西最低;截距表现为渝西最高,渝东北、渝东南较高,渝中最低。渝西地区全硫含量和土层深度的斜率和截距差距最大,渝东南和渝东北次之,渝中较小,表明渝西地区土壤全硫受环境影响程度最大,渝东南和渝东北受影响程度中等,而渝中地区受影响程度最小。

2.4 土壤硫分布的影响因素

2.4.1 土壤类型对硫含量的影响

土壤类型包括潮土、紫色土、水稻土、石灰岩土、黄壤土和黄棕壤土。三层土壤全硫含量的变化趋势均为潮土<紫色土<水稻土<石灰岩土<黄壤土<黄棕壤土(图3)。方差分析表明,研究区不同土壤类型的全硫含量存在显著差异($P<0.01$),进一步的多重比较表明,在水平方向上,潮土全硫含量低于紫色土,但两者之间无显著性差异,黄棕壤土和黄壤土全硫含量显著高于水稻土和石灰岩土,但差异不显著,水稻土与石灰岩土全硫含量差异也不显著。在垂直方向上,不同土壤类型的全硫含量均随土层深度增加而减少,但只有水稻土和紫色土三层全硫含量之间存在显著差

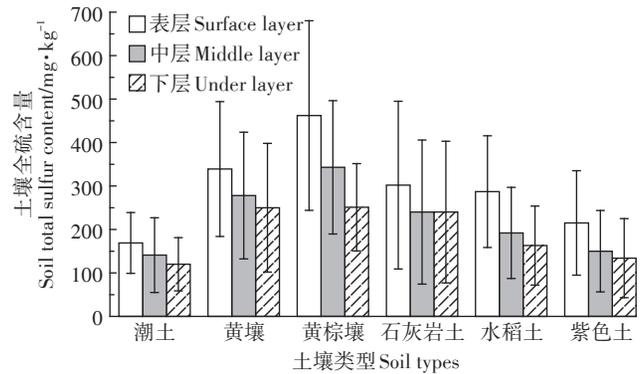


图3 不同土壤类型的全硫含量

Figure 3 The total sulfur content in different soil types

异($P<0.05$),且两类土壤表层分别与中层、下层的全硫含量有显著差异,中层与下层间不存在显著差异,此外,黄壤土表层全硫含量显著高于下层。

2.4.2 地形对土壤硫含量的影响

地形主要是指中山、低山、丘陵和台地。三层全硫含量均呈现中山>低山>丘陵>台地的趋势(图4)。方差分析结果表明,不同地形条件下土壤全硫含量存在显著差异($P<0.01$),进一步的多重比较表明,水平方向上,中山全硫含量显著高于丘陵和台地,但丘陵和台地的全硫含量无显著差异,此外,低山全硫含量显著高于台地。在垂直方向上,低山、丘陵和中山三层土壤全硫含量均存在显著差异($P<0.05$),其中低山、丘陵表层土壤全硫含量显著高于中层和下层,但中层和下层间不存在显著差异,此外,台地和中山表层全硫含量显著高于下层。

2.4.3 土地利用方式对土壤硫含量的影响

土地利用方式包括水田、旱地、林地和未开垦农地。其中水田种植水稻,旱地种植玉米、油菜、胡豆、萝卜、红薯、土豆,林地种植松树、茶叶、花椒、梨、柑橘、枇杷。表层全硫含量以未开垦农地为最高,其次为水田、林地和旱地,中层土壤全硫含量顺序为林地>未开垦农地>水田>旱地,下层则为未开垦农地>林地>水田>旱地(图5)。方差分析表明,不同土地利用方式下的全硫含量不存在显著差异,进一步的多重比较表

表2 不同地区土壤全硫含量(因变量)与土层深度(自变量)的关系

Table 2 Relationship between soil total sulfur content(dependent variable) and soil depth(independent variable) in different regions

参数 Parameters	渝西 The western part of Chongqing	渝东北 The northeast part of Chongqing	渝东南 The southeast part of Chongqing	渝中 The central part of Chongqing
斜率	-41	-51	-52	-42
截距	318	304	293	269

明,水平方向上,水田全硫含量显著高于旱地。在垂直方向上,只有旱地和水田三层土壤全硫含量之间存在显著差异($P<0.01$),且表层全硫含量显著高于中层和下层,但中层和下层间全硫含量不存在显著差异。

2.4.4 pH和有机质对土壤硫含量的影响

对土壤全硫含量与pH、有机质含量之间的关系进行相关性分析(图6、图7),结果表明,土壤全硫含量和pH对数、有机质含量对数之间的相关系数均达到显著水平($P<0.01$)。在本研究中,随着土壤pH对数的增加,全硫含量呈现减少的趋势,有机质含量对数与全硫含量则呈显著正相关。pH对数与土壤全硫含量的相关系数小于有机质含量对数与土壤全硫含量的相关系数,因此,有机质与土壤全硫含量的相关性更强。

2.4.5 土壤硫含量的关键环境因素识别

为了识别对全硫含量分布有显著影响的因素,对各环境因子进行多元线性逐步回归分析(表3)。由于自变量土壤类型(潮土、黄壤土、黄棕壤土、石灰岩土、水稻土和紫色土)、地形(中山、低山、丘陵和台

地)、土地利用方式(林地、旱地、水田和未开垦农地)为分类变量,需将其设置为 $N-1$ 个虚拟变量。分析结果表明,对表层全硫含量有显著影响的有黄壤土($P<0.01$)、有机质($P<0.01$)和水田($P<0.05$);对中层全硫含量有显著影响的有黄壤土($P<0.01$)、石灰岩土($P<0.01$)、黄棕壤土($P<0.01$)和水田($P<0.01$);对下层全硫含量有显著影响的有黄壤土($P<0.01$)、石灰岩土($P<0.01$)和旱地($P<0.05$)。

3 讨论

研究区域内复杂的空间格局决定了其土壤全硫分布受到多种环境因素的交互影响。现有的研究大多选取单一因素进行分析,缺少多种环境因素对全硫综合影响的研究。本文的环境因素包括土壤类型、地形、土地利用方式、pH以及有机质含量等。

与国内相关研究进行对比发现,重庆农田土壤表层全硫含量(算术均值为 $262 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)在我国处于平均水平,高于土壤硫亏缺临界值($150 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),但低于南方10省全硫含量的平均值($299.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。在

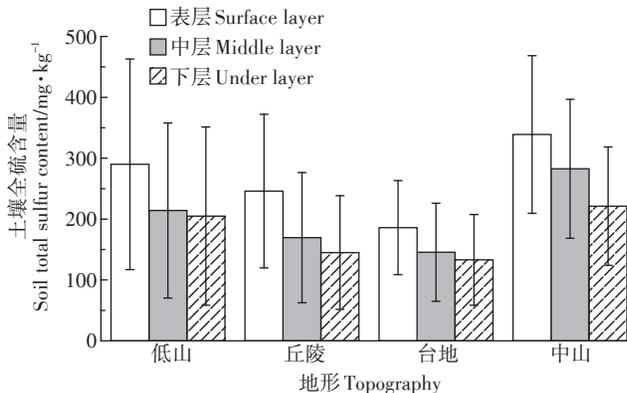


图4 不同地形的全硫含量

Figure 4 The total sulfur content in different topography

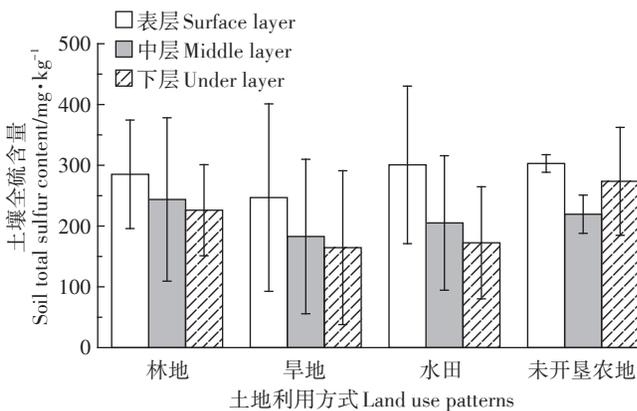


图5 不同土地利用方式的全硫含量

Figure 5 The total sulfur content in different land use patterns

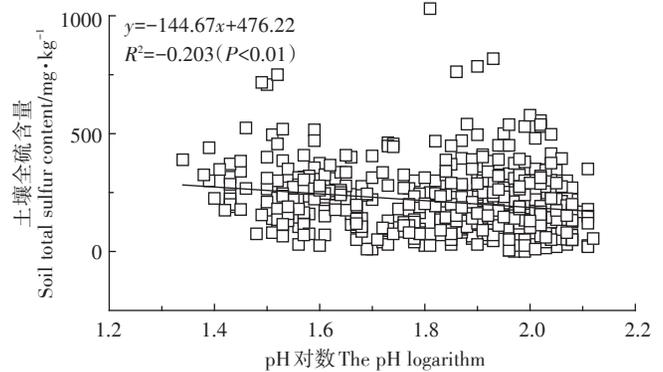


图6 土壤全硫含量和pH的关系

Figure 6 Relationship between soil total sulfur content and pH

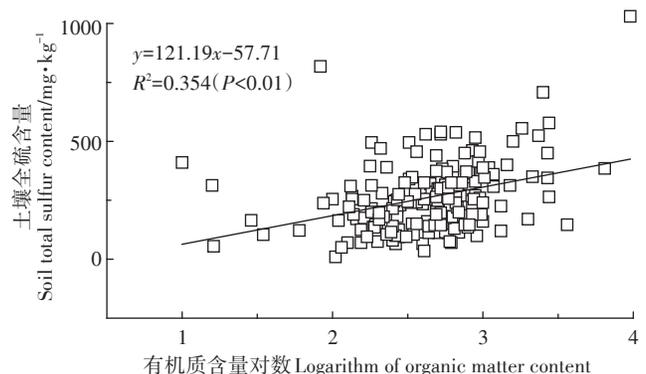


图7 土壤全硫含量和有机质的关系

Figure 6 Relationship between soil total sulfur content and organic matter

表3 土壤全硫含量分布与环境因素关系的逐步回归分析

Table 3 Stepwise regression analysis of the relationship between soil total sulfur content distribution and environmental factors

参数 Parameters	表层 Surface layer			中层 Middle layer				下层 Under layer		
	有机质 Organic matter	黄壤土 Yellow soil	水田 Paddy field	黄壤土 Yellow soil	石灰岩土 Limestone soil	黄棕壤土 Yellow brown soil	水田 Paddy field	黄壤土 Yellow soil	石灰岩土 Limestone soil	旱地 Dry land
<i>P</i> 值	<0.001	0.001	0.046	<0.001	0.001	0.004	0.008	<0.001	<0.001	0.044
<i>T</i> 值	6.431	3.283	2.012	4.991	3.231	2.911	2.676	4.513	3.839	-2.026

水平方向上,全硫含量空间分布总体上呈现渝西、渝东北大于渝东南、渝中的趋势,全硫含量高值区主要分布在綦江、城口,低值区主要在丰都、垫江。这可能是由于渝西土壤肥力高,水田充足^[31],农业生产条件好^[32],再加上綦江是重要产煤区,能源工业较多,SO₂排放量较其他地区高很多^[33];渝东北地貌以山地为主,水热资源和生物资源丰富,城口土壤母质多为泥灰岩、石灰岩,该类母质发育而成的土壤质地黏重,含硫量较高^[25,34];渝东南受三峡库区脆弱生态环境条件限制,经济发展水平较低,农业生产基础薄弱^[35],水土流失现象严重^[33,36],丰都、垫江等地土地利用方式多为旱地,有利于好氧微生物对土壤硫素的分解;渝中大多是中心商务区,城市建设占用大量耕地,且总体停留在农户小规模分散经营状态,农业集约化程度低^[37],再加上重钢、九龙电厂、重庆电厂等燃煤大户的关停搬迁,减少了该地区SO₂的排放。在垂直方向上,全硫具有明显的分层和富集现象,呈现出自上而下逐渐降低的分布特征,这是由于大量死根的腐解归还,以及地表枯落物的分解,为土壤表层提供丰富的有机质^[20],表层土壤中的生物对全硫也存在强烈的富集作用^[38],另外,施肥、大气酸性沉降所带来的硫除满足作物生长需要外,剩余硫素在土壤表层富集、累积^[39],这与高珍珍等^[38]在稻田土壤研究中得到的结果是一致的。全硫含量与土层深度之间的线性关系表明渝西地区土壤全硫受环境影响程度最大,渝东南和渝东北次之,而渝中地区最小,这可能是因为渝西是人为影响最为剧烈的地区。

不同土壤类型中全硫含量存在显著差异($P < 0.01$),该差异主要由两方面原因引起,一是潮土的土壤颗粒较粗^[40],土粒比表面积和电荷密度较小,电荷性较弱,导致其对元素的吸收能力较弱,再加上腐殖质累积量较少,因此潮土含硫量少于其他土类^[41],这与王国平等^[16]对霍林河下游向海湿地不同粒径的沉积物研究中发现细粒全硫含量较高的结论是一致的;紫色土有机质含量低,且母岩疏松,易发生水土流失;

水稻土经过淹水种稻而成,长期处于缺氧状态,有机质含量高;石灰岩土含有较多的Ca²⁺,能与土壤中SO₄²⁻形成难溶硫,难溶硫也是全硫的主要形态;黄壤土和黄棕壤土质地黏重,多为黏土,含硫量较高^[42],这与肖厚军^[25]对贵州耕地土壤硫素状况的研究一致。二是潮土、紫色土的土地利用方式多为旱地,其氧气充足,有利于好氧微生物分解有机质;水稻土多为水田,厌氧条件阻碍有机质分解;石灰岩土多为林地,有机质和腐殖质数量丰富;黄壤土和黄棕壤土多为未开垦农地,侵蚀程度小,土壤养分不易流失。

不同地形条件下,中山和低山地区土壤中全硫含量较高,一方面是由于这些地貌区域多分布有黄棕壤、黄壤土和石灰岩土等全硫含量较高的土类;另一方面,也可能与这些地区水热资源的分配有关,水热资源的空间分布通过影响土壤中有机质矿化和腐殖化过程来影响全硫含量^[43-44],山地海拔高于丘陵、台地,而海拔越高,气温越低,土壤温度随之降低,有机质分解速度减缓,矿化速度也会在低温条件下减小,使有机质累积量增加。而且山地地势较高,植被覆盖率高,水土流失较轻,但丘陵、台地地势较低,植被覆盖率低,汛期受严重的暴雨冲刷,侵蚀程度大,水土流失严重,土壤养分易流失^[45],这与张志霞等^[45]对黄土丘陵区有机碳空间分布的研究结果一致。

土地利用方式作为人类利用土地各种活动的综合反映,其变化不仅能够改变土地覆被状况,如地表植被的变化,影响植物凋落物和残余量,还会引起土壤管理措施的改变,从而导致土壤全硫的变化^[46-48]。国内外对土地利用方式影响土壤全硫分布的研究还比较少,于君宝等^[7]在研究黄河三角洲湿地土壤中硫含量分布时考虑了这一因素。土壤开垦后侵蚀程度加大,土壤硫素通过雨水径流流失,作物对硫的吸收等原因也会导致土壤含硫量减少^[23]。免耕可以降低土壤扰动次数,避免土壤结构的破坏,也可提高土壤有机质含量,使施用的硫肥保蓄在土壤之中^[49],因此未开垦农地的全硫含量较高,林地凋落物量和质量均

较高且易分解,土壤有机质稳定性增加,且随着林地郁闭度的提高,地表温度降低,土壤湿度和水分得以保持,从而降低有机质的分解速度,促进有机质的积累^[50-52]。水田长期处于淹水条件,土壤中好氧微生物分解有机质过程受阻,导致有机质分解速度降低^[53],有利于土壤硫素的积累。旱地则利于有机质分解,再加上其种植的油菜、萝卜和玉米需硫较多^[54-55],因此其全硫含量少于其他利用方式。

研究区土壤pH值范围为3.8~8.3,平均值是6.5,低于陕西农田土壤pH(5.9~9.0)^[6]。本文研究发现,pH对数和全硫含量呈显著负相关($P<0.01$),这是由于pH会影响土壤中硫化物的赋存形态^[56],随着pH值增加,土壤中硫氧化和有机硫矿化速率加快,生成可直接被植物利用的硫酸盐,在作物吸收和淋失后,硫酸盐含量逐渐降低^[57-58],从而导致土壤全硫含量减少。Johnston等^[26]、Kirsten等^[57]对酸性淡水湿地的研究也证实了这一点,并指出pH是影响全硫含量的因素之一。研究区域内土壤有机质含量范围为2.72~53.50 g·kg⁻¹,平均值是15.24 g·kg⁻¹,低于三江平原湿地土壤中有机质平均含量(24.41 g·kg⁻¹)^[21]。本文研究结果表明,有机质含量的对数与全硫含量呈显著正相关($P<0.01$),是因为有机质是土壤有机硫的主要来源,而有机硫又是全硫的主体,这与林慧娜等^[19]对红树林湿地沉积物中硫分布的影响因素的研究结果一致。

多元线性逐步回归分析结果表明,不同深度条件下,对土壤全硫含量空间分布具有显著影响的因子不同。黄壤土在整个剖面上对土壤全硫含量存在显著影响,石灰岩土、黄棕壤土、水田、旱地和有机质在剖面局部层次上对土壤全硫含量存在显著影响。说明土壤类型是影响土壤全硫含量分布的主要因素,水田和旱地的差异主要为有机质的含量,因此有机质是另一主要因素。

4 结论

(1)重庆农田土壤中的硫含量服从对数正态分布。表层土壤全硫的含量范围为10~1030 mg·kg⁻¹,算术平均值为262 mg·kg⁻¹,处于我国土壤硫平均水平,高于作物缺硫临界值150 mg·kg⁻¹,但低于南方10省土壤全硫的平均值299.2 mg·kg⁻¹。

(2)在水平方向上,全硫含量空间分布总体上呈现渝西、渝东北大于渝东南、渝中的趋势;在垂直方向上,呈现出自上而下逐渐降低的分布特征。渝西地区土壤全硫受环境条件影响程度最大,渝东南和渝东北

次之,而渝中地区最小。

(3)不同土壤类型下全硫含量顺序为黄棕壤土>黄壤土>石灰岩土>水稻土>紫色土>潮土;在不同地形条件下,全硫含量呈现中山>低山>丘陵>台地的趋势;在不同土地利用方式下,表层土壤全硫含量顺序为未开垦农地>水田>林地>旱地,中层为林地>未开垦农地>水田>旱地,下层为未开垦农地>林地>水田>旱地。

(4)pH和有机质是土壤全硫含量的影响因素,全硫含量与pH对数呈显著负相关($P<0.01$),与有机质含量对数呈显著正相关($P<0.01$)。

(5)土壤类型和有机质含量是影响土壤全硫含量分布的主要因素,pH、地形、土地利用方式是次要因素。

参考文献:

- [1] 陈冰冰,孙志高,孙文广,等. 外源氮输入对黄河口新生湿地植物-土壤系统硫分布特征的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(16): 5698-5708.
CHEN Bing-bing, SUN Zhi-gao, SUN Wen-guang, et al. Effects of exogenous nitrogen enrichment on the distribution of total sulfur in the plant-soil system of the newly created marshes in the Yellow River estuary, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(16): 5698-5708.
- [2] 何涛,孙志高,李家兵,等. 闽江河口芦苇与短叶荩草空间扩展植物-土壤系统硫含量变化特征[J]. 生态学报, 2018, 38(5): 1607-1618.
HE Tao, SUN Zhi-gao, LI Jia-bing, et al. Variations in total sulfur content in plant-soil systems of *Phragmites australis* and *Cyperus malaccensis* in the process of their spatial expansion in the Min River estuary [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(5): 1607-1618.
- [3] 李新华,刘景双,孙志高. 三江平原小叶章湿地生态系统硫的生物地球化学循环[J]. 生态学报, 2007, 27(6): 2199-2207.
LI Xin-hua, LIU Jing-shuang, SUN Zhi-gao, et al. The biogeochemical cycle of sulfur in *Calamagrostis angustifolia* wetland ecosystem in the Sanjiang Plain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(6): 2199-2207.
- [4] 郭庆军,陈同斌,杨军,等. 利用不同形态硫同位素组成辨识土壤污染过程的方法初探[J]. 环境科学学报, 2011, 31(8): 1730-1735.
GUO Qing-jun, CHEN Tong-bin, YANG Jun, et al. Using different facies of sulfur isotopic composition for tracing the process of soil pollution[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(8): 1730-1735.
- [5] 迟凤琴,汪景宽,张玉龙. 东北地区黑土硫的分布特征及其与土壤性质的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(1): 40-45.
CHI Feng-qin, WANG Jing-kuan, ZHANG Yu-long. The sulphur distribution in relation to properties of black soil in northeastern China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(1): 40-45.
- [6] 高义民,同延安,孙本华,等. 陕西农田土壤硫分布特征及其与土壤性质的关系[J]. 西北农业学报, 2005, 14(3): 177-180.
GAO Yi-min, TONG Yan-an, SUN Ben-hua, et al. The characteristics

- of sulphur distribution in soil and relationships with soil properties of Shaanxi[J]. *Acta Agriculture Boreali-Occidentalis Sinica*, 2005, 14(3): 177-180.
- [7] 于君宝,褚磊,宁凯,等. 黄河三角洲滨海湿地土壤硫含量分布特征[J]. *湿地科学*, 2014, 12(5):559-565.
YU Jun-bao, CHU Lei, NING Kai, et al. Distribution characteristics of soil sulfur content in coastal wetlands of the Yellow River Delta[J]. *Wetland Science*, 2014, 12(5):559-565.
- [8] 刘冬秀. 崇明东滩互花米草入侵对碳-硫循环微生物群落的影响研究[D]. 上海:上海大学, 2015.
LIU Dong-xiu. Effects of *Spartina alterniflora* invasion on bacterial community related to carbon-sulfur cycle in Chongming Dongtan[D]. Shanghai:Shanghai University, 2015.
- [9] 幸颖,刘常宏,安树青. 海岸盐沼地土壤硫循环中的微生物及其作用[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(4):577-581.
XING Ying, LIU Chang-hong, AN Shu-qing. Microbes and their function in sulfur cycle of coastal salt marsh sediments[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(4):577-581.
- [10] 方堃,陈效民,杜臻杰. 低山丘陵区红壤酸雨中典型阴离子垂直迁移状况及模拟[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(1):107-111.
FANG Kun, CHEN Xiao-min, DU Zhen-jie. SO_4^{2-} and NO_3^- break through situations in representative red soils and prediction by hydruS-1D model[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1):107-111.
- [11] 周修萍,江静蓉,梁伟,等. 模拟酸雨对南方五种土壤理化性质的影响[J]. *环境科学*, 1988, 9(3):6-12.
ZHOU Xiu-ping, JIANG Jing-rong, LIANG Wei, et al. Effects of simulated acid rain on physical and chemical properties of five soils in south China[J]. *Environmental Science*, 1988, 9(3):6-12.
- [12] 刘崇群,陈国安,曹淑卿,等. 我国南方土壤硫素状况和硫肥施用[J]. *土壤学报*, 1981, 18(2):185-193.
LIU Chong-qun, CHEN Guo-an, CAO Shu-qing, et al. Sulphur in soil of southern China and the application of sulphur fertilizer[J]. *Acta Pedologia Sinica*, 1981, 18(2):185-193.
- [13] 黄运湘,刘鹏,张杨珠,等. 稻作制与有机肥及地下水位对水稻土硫素状况的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2003, 29(4):322-325.
HUANG Yun-xiang, LIU Peng, ZHANG Yang-zhu, et al. Effects of rices-based cropping system, organic manure and ground water level on sulphur status in paddy soil[J]. *Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences)*, 2003, 29(4):322-325.
- [14] 杨劲峰,韩晓日,唐亮,等. 长期不同施肥对土壤无机硫组分的影响[J]. *土壤通报*, 2008, 39(4):808-811.
YANG Jin-feng, HAN Xiao-ri, TANG Liang, et al. Effects of long-term different fertilization on inorganic sulphur components in soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(4):808-811.
- [15] 杜光辉,饶伟,李鑫,等. 水稻根际与非根际土壤硫素赋存形态转化及其迁移规律[J]. *环境科学*, 2016, 37(7):2779-2790.
DU Guang-hui, RAO Wei, LI Xin, et al. Transformation and migration of sulfur speciation in the rhizosphere and bulk soil of paddy soil[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(7):2779-2790.
- [16] 王国平,刘景双,张玉霞. 向海湿地全硫与有效硫垂直分布[J]. *水土保持通报*, 2003, 23(2):5-8.
WANG Guo-ping, LIU Jing-shuang, ZHANG Yu-xia. Vertical distribution of total sulfur and effective sulfur in Xianghai wetland[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2003, 23(2):5-8.
- [17] Orem W, Newman S, Osborne T Z, et al. Projecting changes in everglades soil biogeochemistry for carbon and other key elements, to possible 2060 climate and hydrologic scenarios[J]. *Environmental Management*, 2015, 55(4):776-798.
- [18] Ruili L, Minwei L, Guo Y Q, et al. Profile nutrient distribution and sedimentary characteristic in typical marshes of Sanjiang Plain[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(8):2928-2936.
- [19] 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, 24(12):79-82.
LIN Hui-na, FU Jiao-yan, WU Hao, et al. Distribution and influential factors of sulfur in mangrove wetlands in China[J]. *Marine Science*, 2009, 24(12):79-82.
- [20] 李瑞利,柴民伟, Sasa K, 等. 三江平原典型沼泽湿地养分累积与沉积特征[J]. *环境科学*, 2014, 35(8):2928-2936.
LI Rui-li, CHAI Min-wei, Sasa K, et al. Profile nutrient distribution and sedimentary characteristics in typical marshes of Sanjiang Plain[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(8):2928-2936.
- [21] 李新华,刘景双,孙志高. 三江平原小叶章湿地植物-土壤系统中硫素分布及季节变化动态[J]. *土壤通报*, 2007, 38(1):85-88.
LI Xin-hua, LIU Jing-shuang, SUN Zhi-gao. Sulfur distribution and seasonal variation dynamics in plant-soil system of ampelopsis microphylla wetland in Sanjiang Plain[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(1):85-88.
- [22] 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[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(6):246-250.
ZENG Cong-sheng, WANG Wei-qi, ZHAI Ji-hong. Characteristics of wetland soil total sulfur and available sulfur distribution in different water-flooded frequency in Minjiang River estuary[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(6):246-250.
- [23] 郝庆菊,王起超,王跃思,等. 开垦利用对三江平原湿地土壤硫含量的影响[J]. *环境科学学报*, 2003, 23(5):614-618.
HAO Qing-ju, WANG Qi-chao, WANG Yue-si, et al. The impact of reclamation activities on soil sulfur contents in the Sanjiang Plain[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, 23(5):614-618.
- [24] Li J D, Sun Z J, Sun F, et al. Spatial distribution characteristics of organic matter and total sulfur of different marsh soil in the Yellow River estuary[J]. *Advanced Material Research*, 2014, 864/865/866/867:30-34.
- [25] 肖厚军. 贵州主要耕地土壤硫素状况及硫肥效应研究[D]. 重庆:西南农业大学, 2003.
XIAO Hou-jun. Study on soil sulfur status and crop response to sulfur fertilizer in Guizhou[D]. Chongqing: Southwest Agricultural University, 2003.
- [26] Johnston S G, Burton E D, Aaso T, et al. Sulfur, iron and carbon cycling following hydrological restoration of acidic freshwater wetlands[J]. *Chemical Geology*, 2014, 32(2):17-26.

- [27] Idaszkin Y L, Bouza P J, Marinho C H, et al. Trace metal concentrations in *Spartina densiflora* and associated soil from a Patagonian salt marsh[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 89(2):444-450.
- [28] 杨青, 刘吉平, 吕宪国, 等. 三江平原典型环型湿地土壤-植被-动物系统的结构及功能研究[J]. *生态学杂志*, 2004, 23(4):72-77.
YANG Qin, LIU Ji-ping, LÜ Xian-guo, et al. Study on structure and function of soil-vegetation-animal system in typical ring wetland in Sanjiang Plain[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(4):72-77.
- [29] 龙军, 张黎明, 沈金泉, 等. 复杂地貌类型区耕地土壤有机质空间插值方法研究[J]. *土壤学报*, 2014, 51(6):1270-1280.
LONG Jun, ZHANG Li-ming, SHEN Jin-quan, et al. Spatial interpolation of soil organic matter in farmlands in areas complex in landform [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(6):1270-1280.
- [30] 刘崇群, 曹淑卿, 吴锡军. 中国土壤硫素状况和对硫的需求[C]//硫、镁和微量元素在作物营养平衡中的作用国际学术研讨会论文集. 成都:成都科技大学出版社, 1993:10-18.
LIU Chong-qun, CAO Shu-qing, WU Xi-jun. Soil sulphur status and sulphur demand in China[C]//The international symposium on the role of sulphur, magnesium and trace elements in crop nutritional balance. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1993:10-18.
- [31] 唐谊娟. 重庆农业结构变动特征及区域优化研究[D]. 重庆:重庆师范大学, 2014.
TANG Yi-juan. Characteristics of agricultural structure changes and regional optimization in Chongqing[D]. Chongqing: Chongqing Normal University, 2014.
- [32] 黎莉莉, 袁昌定, 冯洋, 等. 重庆市农业功能区划研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2009, 30(4):43-46.
LI Li-li, YUAN Chang-ding, FENG Yang, et al. Studies on agricultural function regional planning of Chongqing municipality[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2009, 30(4):43-46.
- [33] 何泽能, 谭炳全, 高阳华, 等. 重庆市酸雨分布特征[J]. *气象科学*, 2008, 36(6):706-711.
HE Ze-neng, TAN Bing-quan, GAO Yang-hua, et al. Distribution features of acid rain in Chongqing[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2008, 36(6):706-711.
- [34] 邓纯章, 龙碧云, 侯建萍. 我国南方部分地区农业中硫的状况及硫酸肥的效果[J]. *土壤肥料*, 1994, 21(3):25-28.
DENG Chun-zhang, LONG Bi-yun, HOU Jian-ping. Sulphur status in agriculture and effect of sulphur fertilizer in some areas of southern China[J]. *Soil and Fertilizer*, 1994, 21(3):25-28.
- [35] 华娟, 涂建军, 卢德彬, 等. 重庆区域经济发展的时空差异分析[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2012, 34(4):129-133.
HUA Juan, TU Jian-jun, LU De-bin, et al. Analysis of the time-space disparities in regional economy development of Chongqing[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2012, 34(4):129-133.
- [36] 杨渝红, 刘秀华, 李霞. 重庆市农业结构调整与土地资源优化配置研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2006, 27(4):49-54.
YANG Yu-hong, LIU Xiu-hua, LI Xia. Studies on adjustment of agriculture structure of Chongqing and optimized scheme of its land resources[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2006, 27(4):49-54.
- [37] 何军, 徐渝. 重庆市渝中区20年酸雨污染变化趋势及成因分析研究[J]. *环境科学与管理*, 2017, 42(12):95-98.
HE Jun, XU Yu. Analysis on characteristics and causes of acid rain pollution in Yuzhong District of Chongqing City in twenty years[J]. *Environmental Science and Management*, 2017, 42(12):95-98.
- [38] 高珍珍, 景伟文, 魏明娜. 干旱区稻田土壤-植物生态系统硫素的动态变化研究[J]. *新疆农业大学学报*, 2013, 36(6):498-503.
GAO Zhen-zhen, JING Wei-wen, WEI Ming-na. Dynamic variations of sulfur in paddy field soil-plant system in arid land[J]. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2013, 36(6):498-503.
- [39] 许闯, 王松山, 李菊梅, 等. 长期施肥对红壤和黑土硫形态演变的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(4):1069-1075.
XU Chuang, WANG Song-shan, LI Ju-mei, et al. Effects of long-term fertilization on evolution of S forms in a red soil and a black soil [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(4):1069-1075.
- [40] 魏孝荣, 邵明安, 高建伦. 黄土高原沟壑区小流域土壤有机碳与环境因素的关系[J]. *环境科学*, 2008, 29(10):2879-2884.
WEI Xiao-rong, SHAO Ming-an, GAO Jian-lun. Relationships between soil organic carbon and environmental factors in gully watershed of the Loess Plateau[J]. *Environment Science*, 2008, 29(10):2879-2884.
- [41] 刘金玲, 丁振华, 李柳强, 等. 中国主要红树林区沉积物粒度分布特征[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2008, 47(6):891-893.
LIU Jin-ling, DING Zhen-hua, LI Liu-qiang, et al. Characters of grain size of sediments from mangrove wetlands of China[J]. *Journal of Xiamen University(Natural Science)*, 2008, 47(6):891-893.
- [42] 张艳, 谢文霞, 杜云鸿, 等. 湿地土壤硫分布及其影响机制研究进展[J]. *土壤通报*, 2016, 47(3):763-767.
ZHANG Yan, XIE Wen-xia, DU Yun-hong, et al. Research advances in distribution characteristics and the influence mechanism of wetland soil sulfur[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(3):763-767.
- [43] Momtaz H R, Jafarzadeh A A, Torabi H, et al. An assessment of the variation in soil properties within and between landform in the Amol region, Iran[J]. *Geoderma*, 2009, 12(3):149-158.
- [44] Nagamatsu D, Yoshihiko H, Mochida Y. Influence of microlandforms on forest structure, tree death and recruitment in a Japanese temperate mixed forest[J]. *Ecological Research*, 2003, 18(4):533-547.
- [45] 张志霞, 许明祥, 师晨迪, 等. 黄土丘陵区不同地貌单元土壤有机碳空间变异的尺度效应[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(7):1173-1182.
ZHANG Zhi-xia, XU Ming-xiang, SHI Chen-di, et al. Scaling effect on spatial variability of soil organic carbon in different geomorphic units on the loess hilly region[J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(7):1173-1182.
- [46] Grandy A S, Robertson G P. Land-use intensity effects on soil organic carbon accumulation rates and mechanisms[J]. *Ecosystems*, 2007, 10(4):58-73.

- [47] Zhang J B, Song C C, Yang W Y. Land use effects on the distribution of labile organic carbon fraction through soil profiles[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(3):660-667.
- [48] 周涛, 史培军. 土地利用变化对中国土壤碳储量变化的间接影响[J]. 地球科学进展, 2006, 21(2):138-143.
ZHOU Tao, SHI Pei-jun. Indirect impact of land use change on soil organic carbon change in China[J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(2):138-143.
- [49] 黄小娟, 江长胜, 郝庆菊, 等. 耕作方式对紫色水稻土全硫及有效硫的影响[J]. 土壤, 2012, 44(2):267-273.
HUANG Xiao-juan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, et al. Tillage effects on soil total sulfur and available sulfur in purple paddy soil [J]. *Soils*, 2012, 44(2):267-273.
- [50] 孙文义, 郭胜利, 宋小燕. 地形和土地利用对黄土丘陵沟壑区表层土壤有机碳空间分布影响[J]. 自然资源学报, 2010, 25(3):443-453.
SUN Wen-yi, GUO Sheng-li, SONG Xiao-yan. Effects of topographies and land use on spatial distribution surface soil organic carbon in hilly region of the Loess Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(3):443-453.
- [51] 吴建国, 张小全, 徐德应. 土地利用变化对土壤有机碳量的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(4):593-599.
WU Jian-guo, ZHANG Xiao-quan, XU De-ying. Impact of land-use change on soil carbon storage[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(4):593-599.
- [52] 陈朝, 吕昌河, 范兰. 土地利用变化对土壤有机碳的影响研究进展[J]. 生态学报, 2011, 31(18):5358-5371.
CHEN Zhao, LÜ Chang-he, FAN Lan. Effects of land use change on soil organic carbon: A review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(18):5358-5371.
- [53] Maj L H. Analysis of sulphur in cultivated soils by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica*, 1991, 41(3):225-261.
- [54] 郑诗樟, 刘志良. 硫肥对土壤质量和生物有效性的研究进展[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2015, 46(5):688-693.
ZHENG Shi-zhang, LIU Zhi-liang. Advances on the availability of sulphur fertilizers for soil quality and biology[J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2015, 46(5):688-693.
- [55] 刘崇群. 硫肥的重要性和我国对硫肥的需求趋势[J]. 硫酸工业, 1995, 21(5):20-23.
LIU Chong-qun. The importance of sulphur fertilizer and the demand trend of sulphur fertilizer in China[J]. *Sulphuric Acid Industry*, 1995, 21(5):20-23.
- [56] 沙聪, 王木兰, 姜玥璐, 等. 红树林土壤pH和其他土壤理化性质之间的相互作用[J]. 科学通报, 2018, 63(26):2745-2756.
SHA Cong, WANG Mu-lan, JIANG Yue-lu, et al. Interactions between pH and other physicochemical properties of mangrove sediments: A review[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(26):2745-2756.
- [57] Kirsten K, Ursula R, Tanja T. Effect of pH on the anaerobic microbial cycling of sulfur in mining-impacted freshwater lake sediments[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2001, 46(2):213-223.
- [58] 徐成凯, 胡正义, 章钢娅, 等. 石灰性土壤中硫形态组分及其影响因素[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 12(4):416-423.
XU Cheng-kai, HU Zheng-yi, ZHANG Gang-ya, et al. Composition of sulphur fractions and impact factors in calcareous soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, 12(4):416-423.