

文章编号: 1008-2786-(2016)2-157-08

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000113

湿润季风气候条件下芒硝矿区土壤盐分 空间分布特征

张俊思¹ 徐薇涵^{1,2} 袁大刚^{1*} 张 潇¹ 王昌全¹

(1. 四川农业大学资源环境学院 四川 成都 611130; 2. 兴文县国土资源局 四川 兴文 644400)

摘 要: 以 ArcGIS 和地统计学为平台, 研究四川盆地西南边缘丹棱县某芒硝矿区土壤 EC、水溶性盐总量(TWSS)及其阴阳离子的空间分布特征。结果表明: 1. 研究区土壤 EC 在 0.06 ~ 2.38 mS/cm, 其平均值为 0.41 mS/cm。TWSS 在 0.48 ~ 5.93 g/kg, 阴离子以 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 为主, 阳离子以 Ca^{2+} 和 Na^+ 为主, 为硫酸盐-苏打型; EC 与 TWSS 呈极显著正相关关系, 它们均受到钙芒硝矿主要成分 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 和 Na^+ 的影响。2. 土壤 EC、TWSS 和 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 具有强烈空间相关性; Cl^- 和 Mg^{2+} 具有中等空间相关性, 说明 EC、TWSS、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Ca^{2+} 、 K^+ 和 Na^+ 受结构性因素的影响大, Cl^- 和 Mg^{2+} 的空间分布是结构性因素和随机因素共同作用的结果。3. 土壤 TWSS 的空间分布呈从矿区向周围递减的特征, HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 含量的高值区均出现在矿区附近, EC 和 Na^+ 含量的高值区不仅出现在矿区附近还出现在北部区域; Cl^- 和 NO_3^- 的含量呈从南到北递增的趋势。根据盐渍化分级标准, 研究区土壤盐渍化样点数占总样点数的 44.23%, 而面积占总面积的 53.25%, 应采取相应措施进行修复与治理。

关键词: 芒硝矿区; 土壤盐分; 空间分布

中图分类号: S156.4

文献标志码: A

土壤盐渍化是指易溶性盐分在土壤表层积累的现象, 主要发生在干旱、半干旱、半湿润和滨海地区, 是这些地区农业可持续发展的资源制约因素。由于土壤中的盐分具有高度的空间异质性^[1], 对土壤盐分的空间变异进行充分了解便成为土壤盐渍化防控与盐渍土资源利用的基础和土壤科学研究的前沿热点之一^[2]。地统计学方法是分析土壤属性空间分布特征及其变化规律的有效方法之一, 已被广泛用于土壤盐分的空间变异研究, 如我国学者对银川平原^[3]、典型绿洲^[4]、黄河三角洲^[2]、环渤海^[5]、黄淮海^[6-7]和滨海平原^[8]等地区土壤盐分的空间分布格

局进行了大量研究。

利用高矿化度水进行灌溉会导致土壤次生盐渍化。四川省眉山市丹棱县位于四川盆地西南边缘, 地处亚热带季风性湿润地区, 由于芒硝矿区的影响, 水体中的矿化度升高^[9], 县辖神虹、应林、汇祥、华康矿段地下水的矿化度在 2008 年就达到 2.2 g/L^[10], 利用芒硝矿开采废水灌溉已致使土壤发生次生盐渍化, 从而导致土壤生产水平低下甚至颗粒无收^[11]。然而, 迄今为止未见湿润季风气候条件下的芒硝矿区土壤盐分及其组成离子空间变异的研究报道。鉴于此, 本文运用地统计学和 GIS 的理论和技术, 开展

收稿日期(Received date): 2014-06-12; 修回日期(Accepted): 2014-09-03。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(41371230; 40801079)。[Supported by National Nature Science Foundation of China (41371230; 40801079)]

作者简介(Biography): 张俊思(1990-), 女, 四川成都人, 硕士研究生, 主要从事土壤资源可持续利用研究。[Zhang Junsu (1990-), female, was born in Chengdu, Sichuan Province, graduate student, mainly engaged in the study of sustainable use of soil resources.] E-mail: 1158016014@qq.com

* 通信作者(Corresponding author): 袁大刚(1975-), 男, 博士, 副教授, 主要从事土壤资源可持续利用研究。[Yuan Dagang (1975-), male, Dr & Associate professor, mainly engaged in the study of sustainable use of soil resources.] E-mail: gangday@sohu.com

丹棱县芒硝矿区土壤盐分及其组成离子的空间分布特征研究,为该区盐渍化土壤改良与永续利用提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区(图1)位于丹棱县某化工有限公司周边,面积约为 1.54 km^2 的区域,地理位置为 $29^{\circ}59'20.1''\sim 29^{\circ}59'52.4''\text{ N}$, $103^{\circ}20'16.1''\sim 103^{\circ}21'14.4''\text{ E}$,属亚热带季风性湿润气候,四季温和,冬无严寒,夏无酷暑,年均气温 $16.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,无霜期 315 d ,日照 $1\,140\text{ h}$,年均降水量 $1\,233\text{ mm}$ 。地势南高北低,东、西高中间低,地貌类型以平坝和低山丘陵为主,海拔 $470\sim 500\text{ m}$ 。含矿地层主要为上白垩统灌口组第二段,上覆第三段,岩性为紫红色、灰绿色薄-中厚层状泥质粉砂岩、粉砂质泥岩,局部夹薄层泥岩,岩石中硬石膏团块或条带由上往下逐步增多^[9]。地下水类型主要为第四系松散岩类孔隙水、基岩风化裂隙水和溶蚀孔洞水,基岩风化裂隙水(潜水)分布广泛^[10]。土地利用方式有耕地、林地、园地、工矿用地等,以耕地为主;耕地又以水田为主,主要分布于平坝区;工矿用地中采矿地分布于低山丘陵区,工业用地丘陵、平坝区均有。土壤类型主要为灌口组紫色岩风化物发育的紫色土和现代河流紫色冲积物经长期水耕熟化形成的水稻土。该化工有限公司建于2000年,占地面积 0.1 km^2 ,是一家以芒硝矿[主要为无水芒硝(Na_2SO_4 ,又名元明粉)、钙芒硝和石膏^[9,12]]开采和硫化碱生产为主的大型民营企业,拥有年产元明粉 $30\times 10^4\text{ t}$ 、硫化碱 $4\times 10^4\text{ t}$ 的生产能力,公司钙芒硝矿储量可供开发100 a以上。

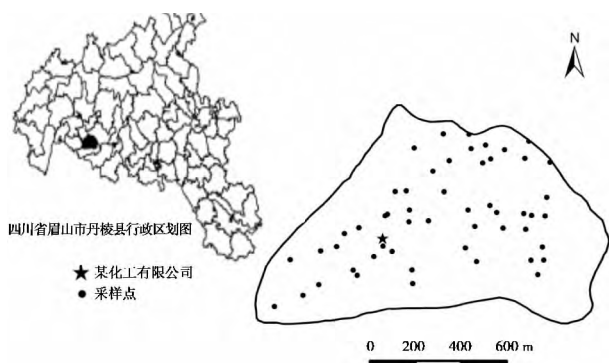


图1 丹棱县某芒硝矿区土壤采样位置分布图

Fig. 1 Distribution of soil sampling sites in certain mirabilite area of Danling County, Sichuan

1.2 土壤样品采集与处理

考虑样品的代表性和均匀性,兼顾地形、水文和土地利用等因素,研究区共布设52个采样点(图1),间距约为 100 m ,于2012年5月油菜收获后采样。土壤样品采集时,每个采样位置确定一个边长为 $2.5\text{ m}\times 2.5\text{ m}$ 的正方形田块,再按梅花形采样法确定正方形中心和4个顶点为采样点;由于植物根系主要分布在 $0\sim 20\text{ cm}$ 土层,因此每个采样点采集 $0\sim 20\text{ cm}$ 土层的土样,将5个采样点的土样混合后,用四分法去除多余土样,形成一个分析样,每个样品约 1 kg 。样品采回后置于阴凉通风处自然风干,剔除植物根系、有机残体以及侵入体后,研磨,过 10 目孔径的尼龙筛,混合均匀后装自封袋中待测。

1.3 土壤盐分测定

土壤电导率(EC)用电导率仪测定; CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 用双指示剂中和法测定; Cl^- 用 AgNO_3 滴定法测定; Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 用 EDTA 络合滴定法测定; SO_4^{2-} 用 EDTA 间接滴定法测定; K^+ 和 Na^+ 用火焰光度法测定,具体测定方法见文献^[13]; NO_3^- 用紫外分光光度法测定,土壤水溶性盐总量($TWSS$)用离子加和法计算^[14],由于未检测出 CO_3^{2-} ,因此在“结果与分析”中未将其纳入。

1.4 数据处理

用SPSS20.0进行描述性分析、相关分析和非参数检验;用地统计学软件GS+7.0进行半方差函数模型拟合;根据半方差函数模型,在ArcGIS9.3中对各指标进行普通Kriging插值。

2 结果与分析

2.1 土壤盐分的常规统计特征

由表1可知,研究区土壤盐分各指标最大值与最小值相差均较大,其中 Ca^{2+} 相差近393倍;根据变异系数(CV)等级划分标准^[15], $TWSS$ 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 K^+ 均属于中等变异强度($10\% < CV < 100\%$),而 EC 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 属于强变异强度($CV > 100\%$),尤其是 Ca^{2+} 和 Na^+ , CV 甚至 $> 200\%$ 。这是地形、水文、土地利用等因素综合作用的结果^[16]。从平均值来看,土壤盐分中的阴离子含量高低顺序依次为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$,阳离子含量高低顺序依次为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$,可见阴离子以 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 为主,而阳离子以 Ca^{2+} 和 Na^+ 为主,即研究区的土壤盐分类型为硫

表 1 丹棱县某芒硝矿区土壤盐分描述性统计分析

Tab. 1 Descriptive statistical analysis of soil salinity in certain mirabilite area of Danling County ($n = 52$)

指标	最大值	最小值	平均值	标准差 SD	变异系数 $CV/\%$	偏度	峰度	p	p^*	分布类型
EC	2.38	0.06	0.41	0.44	106.95	2.91	9.31	0.002	0.345	LgN
$TWSS$	5.93	0.48	1.67	1.13	67.75	2.29	6.20	0.086		N
HCO_3^-	1 213.53	47.82	303.46	181.70	59.88	2.47	11.29	0.324		N
Cl^-	65.32	1.42	19.00	18.15	95.51	1.54	1.30	0.013	0.43	LgN
SO_4^{2-}	2 337.65	63.31	885.74	507.85	57.34	0.52	0.34	0.798		N
NO_3^-	180.17	5.19	51.35	35.49	69.11	1.76	4.41	0.174		N
Ca^{2+}	2 766.10	7.04	270.57	586.38	216.72	3.74	13.16	0.000	0.127	LgN
Mg^{2+}	579.35	2.15	47.52	89.23	187.77	4.71	25.64	0.000	0.673	LgN
K^+	36.05	0.57	12.52	7.79	62.26	0.90	0.60	0.355		N
Na^+	1 569.15	8.60	79.61	215.56	270.75	6.74	47.13	0.000	0.073	LgN

注: N 为正态分布, LgN 为对数正态分布; p 为未经转换所得的 K-S 检验值; p^* 为经对数转换后所得的 K-S 检验值; EC 单位为 mS/cm , $TWSS$ 单位为 g/kg , HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 的单位均为 mg/kg 。

表 2 丹棱县某芒硝矿区土壤盐分指标间的相关分析

Tab. 2 Correlation coefficients between soil dissolvable ions and total content in certain mirabilite area of Danling County

指标	EC	$TWSS$	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+
$TWSS$	0.750**								
HCO_3^-	-0.079	0.249							
Cl^-	0.067	0.117	0.261						
SO_4^{2-}	0.366**	0.823**	0.359**	0.174					
NO_3^-	-0.042	-0.266	0.048	0.522**	-0.227				
Ca^{2+}	0.845**	0.883**	-0.107	-0.050	0.527**	-0.330*			
Mg^{2+}	0.512**	0.581**	0.047	-0.102	0.398**	-0.313*	0.629**		
K^+	-0.195	-0.332*	-0.405**	-0.187	-0.390**	-0.053	-0.142	-0.164	
Na^+	0.637**	0.506**	-0.125	0.002	0.098	-0.079	0.566**	0.011	-0.041

注: ** 表示在 99% 的置信区间上达到极显著水平, * 表示在 95% 置信区间上达到显著水平。 $n = 52$

酸盐-苏打型,这与研究区的芒硝矿类型相吻合。

由表 2 可知, EC 与 $TWSS$ 呈极显著正相关关系,表明 $TWSS$ 是影响土壤 EC 的重要因素; EC 与 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 也呈极显著正相关,而与 HCO_3^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 和 K^+ 无显著相关关系,表明 EC 主要受盐分中主要阴离子 SO_4^{2-} 和主要阳离子 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 的影响。 $TWSS$ 与 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 呈极显著正相关关系,而与 K^+ 呈极显著负相关关系,与 HCO_3^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 无显著相关关系,进一步证明土壤水溶性盐总量主要受 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 制约。 Ca^{2+} 与 SO_4^{2-} 呈极显著正相关,同时 Na^+ 和 Mg^{2+} 与 Ca^{2+} 均呈极显著正相关关系,而 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 与 HCO_3^- 均无显著相关关系,进

一步证明 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 均来自钙芒硝矿床。

根据硫酸盐-苏打型盐化土壤的划分标准^[17],对 $TWSS$ 进行分级。在 52 个采样点中,非盐化土壤 ($TWSS \leq 1.5 g/kg$)、轻度盐化土壤 ($1.5 g/kg < TWSS \leq 3.0 g/kg$)、中度盐化土壤 ($3.0 g/kg < TWSS \leq 5.0 g/kg$) 和重度盐化土壤 ($5.0 g/kg < TWSS \leq 7.0 g/kg$) 分别为 29、20、1、2 个,所占百分比分别为 55.77%、38.46%、1.92%、3.85%;土样中不存在盐土 ($TWSS > 7.0 g/kg$) (图 2)。若从 $TWSS$ 平均值来看,研究区内所采土样总体属于轻度盐化土壤。

2.2 土壤盐分的地统计特征

半方差函数也称半变异函数,是地统计学中研

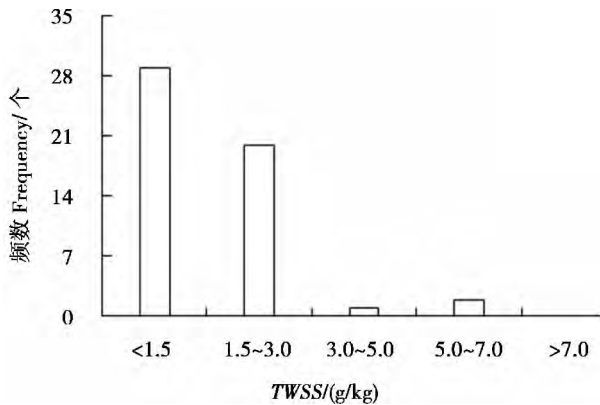


图2 丹棱县某芒硝矿区土壤 TWSS 频率分布图

Fig. 2 Frequency distribution of soil TWSS in certain mirabilite area of Danling County

究土壤变异性的关键函数,可以用来确定结构性因素和随机性因素对土壤空间变异的影响大小^[18]。半方差函数模型选择的决定参数是残差和决定系数,根据残差越小,决定系数越大的原则选择最优模型^[19]。研究区土壤 EC 、 $TWSS$ 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 HCO_3^- 和 Na^+ 符合指数模型, SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 K^+ 符合球状模型(表3)。

Co 反映来源于远小于抽样间距的空间尺度上土壤性质的差异,它的大小直接限制空间插值的精度; C 反映非随机原因形成的变异^[19-20]。研究区内的可溶性盐分离子的 Co 均为正值(表3),表明该区存在着由采样误差、短距离的变异、随机变异引起的各种随机误差; $TWSS$ 和 EC 及各种水溶性盐分离子的 Co 均 $< C$, 说明随机误差中人为因素的干扰并没有使数据的随机性掩盖数据的结构性,这可以从

$TWSS$ 、 EC 和各水溶性盐分离离子具有中等以上的空间相关性得到印证。

$Co/(Co + C)$ 是指随机部分引起的空间异质性占系统总变异的比率^[20],其值越大,说明由随机部分引起的空间变异性程度越大,反之,则说明由空间自相关部分引起的空间变异性程度较大^[21];此外, $Co/(Co + C)$ 也可以作为区域化变量空间相关程度的划分标准^[22]。若 $Co/(Co + C) < 0.25$, 表明具有强烈的空间相关性;若 $Co/(Co + C)$ 在 $0.25 \sim 0.75$ 间,表明具有中等空间相关性;若 $Co/(Co + C) > 0.75$, 表明空间变量空间相关较弱,若 $Co/(Co + C)$ 接近 1, 则说明空间变量在整个尺度上的变异几乎是随机的^[23]。 EC 、 $TWSS$ 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Ca^{2+} 、 K^+ 和 Na^+ 的 $Co/(Co + C)$ 在 $0.0007 \sim 0.1735$ 范围内, < 0.25 , 具有强烈的空间相关性; Cl^- 和 Mg^{2+} 的 $Co/(Co + C)$ 分别为 0.3534 、 0.2720 , 在 $0.25 \sim 0.75$ 间, 具有中等空间相关性,这意味着 EC 、 $TWSS$ 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Ca^{2+} 、 K^+ 和 Na^+ 受结构性因素(母质、地形、植被、土壤类型等)的影响大, Cl^- 和 Mg^{2+} 的空间分布是结构性因素和随机因素(人为因素)共同作用的结果。

Ao 也称空间最大相关距离,反映区域化变量空间自相关范围的大小,是半变异趋向稳定时的样对距离,区域化变量若在 Ao 范围内,则它具有空间相关性,若超出 Ao 范围则随机分布^[20]。研究区土壤除 Cl^- 外,其他盐分离子的 Ao 均在 $20 \sim 80$ m, 空间相关距离较小,在采样间距范围内。 Cl^- 的空间相关距离为 420 , 大于采样间距,出现自相关距离大的

表3 丹棱县某芒硝矿区土壤盐分半方差函数模型及相关参数

Tab. 3 Semivariance model and corresponding parameters for soil salinity in certain mirabilite area of Danling County

项目	模型	块金值 Co	偏基台值 C	基台值 $Co + C$	块金系数 $Co/(Co + C)$	变程 Ao/m	残差	决定系数 R^2
EC	Exponential	2.10×10^{-2}	1.00×10^{-1}	1.21×10^{-1}	0.173 6	43	2.65×10^{-2}	0.574
$TWSS$	Exponential	1.00×10^{-2}	1.16×10^0	1.16×10^0	0.008 6	20	3.83×10^0	0.587
HCO_3^-	Exponential	5.00×10^2	3.60×10^4	3.65×10^4	0.013 7	30	5.63×10^9	0.740
Cl^-	Exponential	6.75×10^{-2}	1.24×10^{-1}	1.91×10^{-1}	0.353 4	420	1.17×10^{-2}	0.516
SO_4^{2-}	Spherical	1.00×10^2	2.40×10^5	2.40×10^5	0.000 4	58	2.53×10^{10}	0.349
NO_3^-	Exponential	4.30×10^1	1.26×10^3	1.30×10^3	0.033 0	73	7.01×10^6	0.479
Ca^{2+}	Spherical	9.20×10^{-2}	1.11×10^0	1.20×10^0	0.076 7	39	1.02×10	0.908
Mg^{2+}	Spherical	6.91×10^{-2}	1.85×10^{-1}	2.54×10^{-1}	0.272 0	79	5.40×10^{-1}	0.777
K^+	Spherical	1.01×10^1	5.57×10^1	6.58×10^1	0.153 5	50	5.85×10^{-3}	0.548
Na^+	Exponential	1.00×10^{-4}	1.34×10^{-1}	1.40×10^{-1}	0.000 7	63	7.58×10^{-2}	0.521

注: Exponential 代表指数模型, Spherical 代表球状模型。

原因可能是它在空间分布的水平方向上有明显的趋势,从而使它产生了漂移现象^[24]。

2.3 土壤盐分的空间分布特征

数据的正态分布是进行普通 Kriging 插值的基础。由表 1 可见,在 $p \leq 0.05$ 的显著水平下,研究区土壤的 $TWSS$ 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 K^+ 均呈正态分布, EC 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 均呈对数正态分布,表明普通 Kriging 插值方法是有效的。

由图 3 可见,研究区土壤 EC 最高区出现在矿区周围,这是因为矿区 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 含量高,所以 EC 值高(表 2);西北部区域含量较高,与土地利用有一定关系:根据实地考察和遥感影像得知,西北部区域从事过大棚栽培,这导致了土壤一定程度的盐渍化。 $TWSS$ 以芒硝矿区为中心,向四周递减,可见 $TWSS$ 受芒硝矿区母质中所含芒硝的影响较大。研究区没有盐土、重度盐化土壤,中度盐化土壤仅出现在矿区附近的小区域范围内,轻度盐化土壤在较大区域有分布,而非盐化土壤主要分布于北部和东部区域。虽然土壤 EC 与 $TWSS$ 具有极显著的正相关关系,但二者的空间分布规律却不完全一致,这是因为 EC 除受 $TWSS$ 的影响,还受其他水溶性离子等因素的影响^[25-26]。

由图 4 可知,土壤阴离子中的 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 及阳离子中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量大致呈从西南向东北递减的特征,高值区出现在采矿区附近,这表明矿区土壤母质中存在的芒硝等成分对土壤主要阴离子和阳离子含量的影响很大;其分布特征也受地形地貌和离子自身性质因素的影响,由于钙、镁的硫酸盐和碳酸盐溶解度较小,在以水作载体而沿坡流动过程中,它将会首先沉积^[17],所以不能迁移到较远的距离并聚集。

由图 4 可知,土壤 Cl^- 和 NO_3^- 含量表现出从南到北含量递增的趋势,北部地区含量最高,与地形、沟渠流向有关,研究区地势南高北低,东、西高中间低,区域内沟渠流向为从南到北,而 Cl^- 和 NO_3^- 溶解度较大,又不易被土壤胶体所吸附,因而易随水迁移到较远的距离,这使得上游 Cl^- 和 NO_3^- 向下游迁移并在下游积累;也与该区曾从事大棚栽培有关,该类土壤与大田土壤相比, Cl^- 和 NO_3^- 含量增加显著^[27]。

K^+ 的空间分布表现出从西南部向东北部含量增加的特征,在采矿区附近含量最低; Na^+ 含量的高值区为采矿区和北部区域,它们的分布不仅受母质的影响还受地形、沟渠流向和其自身性质等影响。芒硝中含大量 Na^+ 而很少 K^+ ,所以采矿区土壤也呈 Na^+ 多 K^+ 少的特征, Na^+ 的移动性高于 K^+ ^[28],所以矿区的 Na^+ 可以迁移到下游低洼地区聚集。

2.4 盐渍化土壤面积统计

根据普通 Kriging 插值得到的 $TWSS$ 的空间分布图,对研究区的盐渍化土壤面积进行统计。图 5 表明,研究区内非盐化土壤、轻度盐化土壤和中度盐化土壤的面积分别为 0.72 km^2 、 0.80 km^2 和 0.02 km^2 ,所占百分比分别为 46.75% 、 51.65% 、 1.60% ,即研究区内盐渍化土壤的面积已达 0.82 km^2 ,占 53.25% 。

3 结论

1. 研究区土壤盐分类型为硫酸盐-苏打型,是钙芒硝矿主要成分 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 影响的结果。盐渍化土壤以轻度盐渍化为主,占总采样点的 38.46% ,中度盐化土壤为 5.77% ,没有重度及以

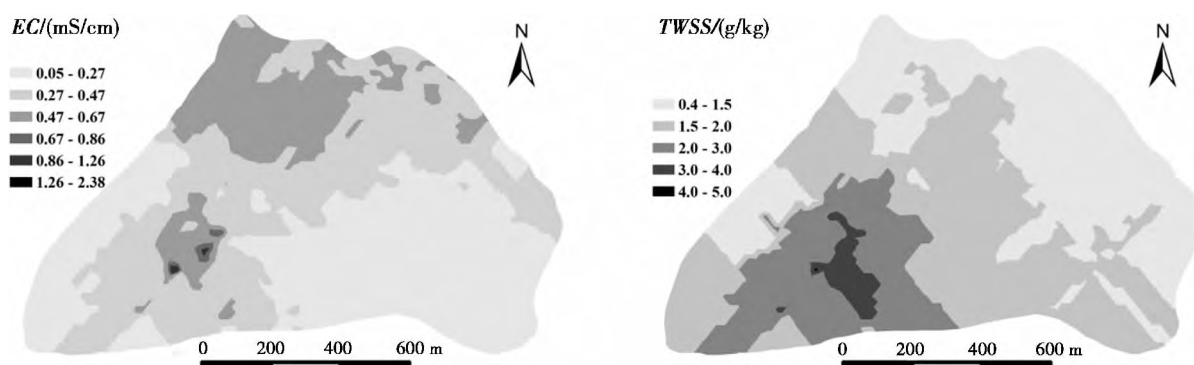


图3 丹棱县某芒硝矿区土壤 EC 和 $TWSS$ 空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of soil EC and $TWSS$ in certain mirabilite area of Danling County, Sichuan

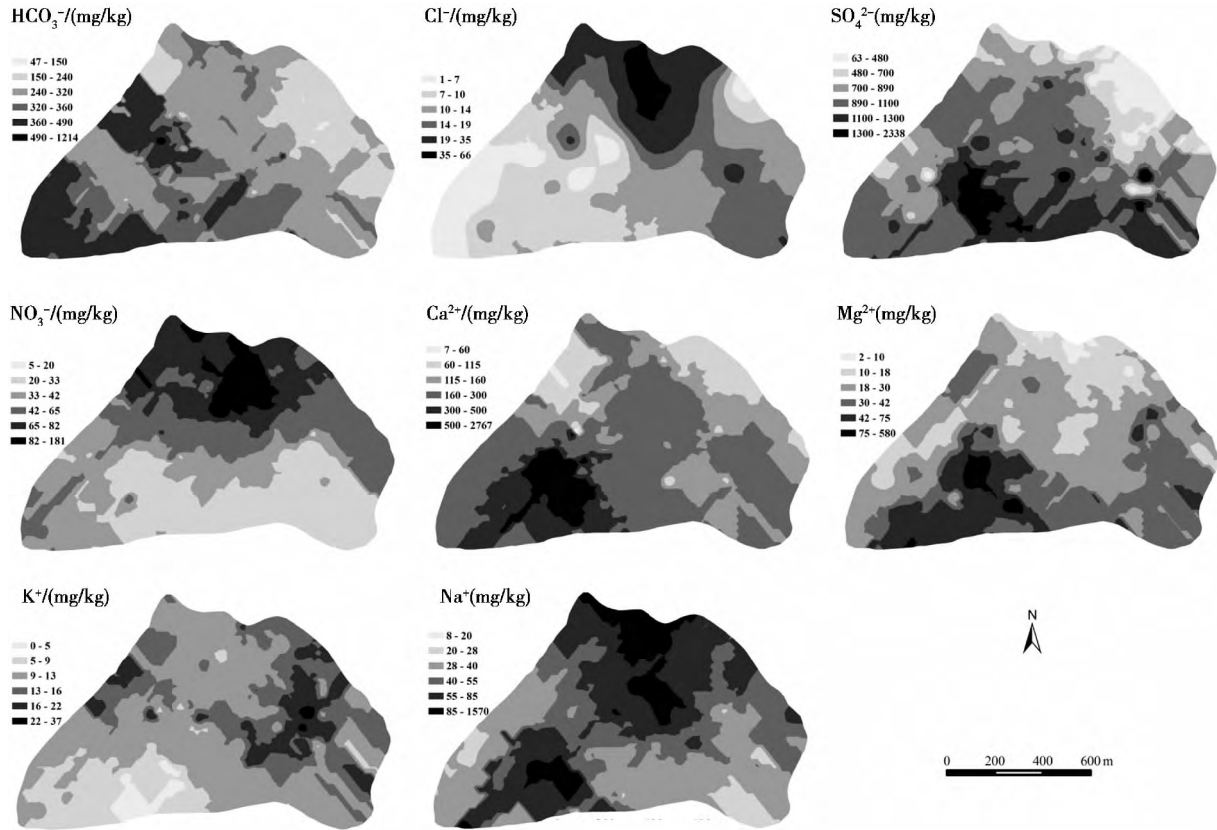


图 4 丹棱县某芒硝矿区水溶性盐分离子空间分布特征

Fig. 4 Spatial distribution of the water-soluble salt ions in certain mirabilite area of Danling County Sichuan

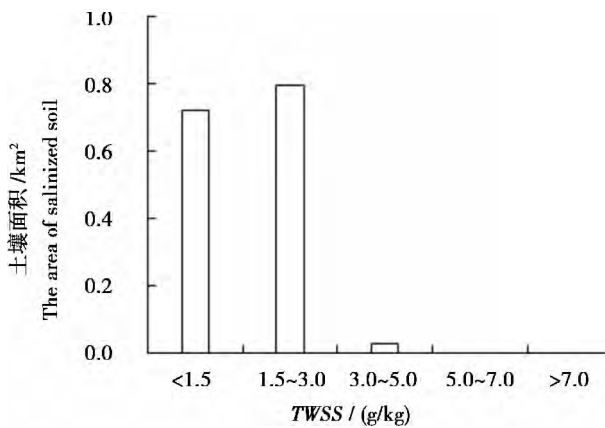


图 5 用普通 Kriging 插值预测的丹棱县某芒硝矿区盐渍化土壤面积分布图

Fig. 5 Distribution of salinized soil predicted by ordinary Kriging in certain mirabilite area of Danling County

上程度的盐化土壤。

2. 研究区土壤 EC 、 $TWSS$ 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Ca^{2+} 、 K^+ 和 Na^+ 具有强烈的空间相关性, Cl^- 和 Mg^{2+} 具有中等空间相关性, 表明 EC 、 $TWSS$ 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Ca^{2+} 、 K^+ 和 Na^+ 受结构性因素的影响

大, Cl^- 和 Mg^{2+} 的空间分布是结构性因素和随机因素共同作用的结果。

3. 土壤 $TWSS$ 的空间分布呈从矿区向周围递减的特征, HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 含量的高值区均出现在矿区附近, EC 和 Na^+ 含量的高值区不仅出现在矿区附近还出现在北部区域, Cl^- 和 NO_3^- 的含量呈从南到北递增的趋势, 表明矿区母质对 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 的影响大, 会导致土壤的盐渍化, 盐渍化面积占研究区总面积的 53.25%, 应采取相应措施进行修复与治理。

致谢: 感谢四川农业大学资源环境学院李启权博士对地统计与空间插值分析提出宝贵意见!

参考文献(References)

- [1] 宋新山, 邓伟, 何岩, 等. 土壤盐分空间分异研究方法及其展望[J]. 土壤通报, 2001, 32(6): 250-254 [Song Xinshan, Deng Wei, He Yan, et al. Methods and prospect on spatial variation of salt in soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2001, 32(6): 250-254]
- [2] 姚荣江, 杨劲松, 刘广明, 等. 黄河三角洲地区典型地块土壤盐分空间变异特征研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6): 61

- 66 [Yao Rongjiang, Yang Jingsong, Liu Guangming, et al. Spatial variability of soil salinity in characteristic field of the Yellow River delta [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(6): 61-66]
- [3] 张源沛, 胡克林, 李保国, 等. 银川平原土壤盐分及盐渍土的空间分布格局 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 19-24 [Zhang Yuanpei, Hu Kelin, Li Baoguo, et al. Spatial distribution pattern of soil salinity and saline soil in Yinchuan plain of China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(7): 19-24]
- [4] 刘广明, 吕真真, 杨劲松, 等. 典型绿洲区土壤盐分的空间变异特征 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 100-107 [Liu Guangming, Lv Zhenzhen, Yang Jingsong, et al. Spatial variation characteristics of soil salinity in typical oasis region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(16): 100-107]
- [5] 周在明, 张光辉, 王金哲, 等. 环渤海微咸水区土壤盐分及盐渍化程度的空间格局 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 15-20 [Zhou Zaiming, Zhang Guanghui, Wang Jinzhe, et al. Spatial pattern of soil salinity and soil salinization in area around Bohai Sea [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(10): 15-20]
- [6] 白由路, 李保国, 石元春. 基于 GIS 的黄淮海平原土壤盐分分布与管理研究 [J]. 资源科学, 1999, 21(4): 66-70 [Bai Youlu, Li Baoguo, Shi Yuanchun. Research of the soil salt content distribution and management in Huan-Huai-Hai plain based on GIS [J]. Resources Science, 1999, 21(4): 66-70]
- [7] 杨萍果, 杨苗, 毛任钊. 海河低平原不同地貌土壤盐分特征研究 [J]. 土壤, 2011, 43(2): 285-288 [Yang Pingguo, Yang Miao, Mao Renzhao. Study on soil salt characteristics of different landforms in low Haihe River plain [J]. Soils, 2011, 43(2): 285-288]
- [8] Shi Z, Li Y, Wang R C, et al. Assessment of temporal and spatial variability of soil salinity in a coastal saline field [J]. Environmental Geology, 2005, 48(7): 171-178
- [9] 李守群, 杨东, 沈云龙, 等. 四川眉山开采芒硝矿地下水的疏干与防治 [J]. 四川地质学报, 2007, 27(3): 195-197 [Li Shouqun, Yang Dong, Shen Yunlong, et al. Mine water drainage and control in the Meishan mirabilite deposits, Sichuan [J]. Acta Geologica Sichuan, 2007, 27(3): 195-197]
- [10] 王昆. 四川眉山芒硝矿主要环境地质问题与防治对策 [J]. 四川地质学报, 2008, 28(3): 225-229 [Wang Kun. Main geologic environmental problems and control in the Meishan mirabilite deposit, Sichuan [J]. Acta Geologica Sichuan, 2008, 28(3): 225-229]
- [11] 王寿廷, 江俊德. 四川省眉山地区硝水田的成因和改良 [J]. 土壤通报, 1960, 4(3): 22-25 [Wang Shouyan, Jiang Junde. The cause and improvement of nitrate paddy field in Mei-Peng area of Sichuan province [J]. Chinese Journal of Soil Science, 1960, 4(3): 22-25]
- [12] 杨俊辉. 芒硝生产与环境保护 [J]. 黑龙江科技信息, 2008, (11): 113, 215 [Yang Junhui. Mirabilite's production and environmental protection [J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2008, (11): 113, 215]
- [13] 李西开. 土壤农业化学常规分析方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1983: 195-219 [Li Youkai. Routine analysis methods for soil agricultural chemistry [M]. Beijing: Science Press, 1983: 195-219]
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 87-133 [Lu Rukun. Analytical methods for soil agrochemistry [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999: 87-133]
- [15] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1988: 323-326 [Lei Zhiedong, Yang Shixiu, Xie Senchuan. Soil Water Dynamics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988: 323-326]
- [16] 姚荣江, 杨劲松, 刘广明. 土壤盐分和含水量的空间变异性及其 Cokriging 估值—以黄河三角洲地区典型地块为例 [J]. 水土保持学报, 2006, 20(5): 133-138 [Yao Rongjiang, Yang Jingsong, Liu Guangming. Spatial variability of soil salinity and moisture and their estimations by Cokriging method - A case study in characteristic field of Yellow River delta [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(5): 133-138]
- [17] 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培. 中国盐渍土 [M]. 北京: 科学出版社, 1993: 9-21, 31, 131-132 [Wang Zunqin, Zhu Shouquan, Yu Renpei. Saline Soils in China [M]. Beijing: Science Press, 1993: 9-21, 31, 131-132]
- [18] 孙运朋, 陈小兵, 张振华, 等. 滨海棉田土壤盐分时空分布特征研究 [J]. 土壤学报, 2013, 50(5): 892-899 [Sun Yunpeng, Chen Xiaobing, Zhang Zhenhua, et al. Temporal-spatial distribution of soil salt in coastal cotton field soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(5): 892-899]
- [19] 侯景儒. 实用地质统计学 [M]. 北京: 地质出版社, 1998: 36-50 [Hou Jingru. The Practical Geological Statistics [M]. Beijing: Geological Publishing Press, 1998: 36-50]
- [20] 白世彪, 王建, 常直杨. Surfer® 10 地学计算机制图 [M]. 北京: 科学出版社, 2012: 224-248 [Bai Shibiao, Wang Jian, Chang Zhiyang. Surfer® 10 Geoscience Computer Graphics [M]. Beijing: Science Press, 2012: 224-248]
- [21] 张云霞, 李玲, 付巧玲, 等. 开封市土壤地球化学元素分布特征研究 [J]. 土壤通报, 2014, 45(2): 272-280 [Zhang Yunxia, Li Ling, Fu Qiaoling, et al. Geochemical distribution characteristics of soil elements in Kaifeng city [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(2): 272-280]
- [22] Wang Y Q, Zhang X C, Huang C Q. Spatial variability of soil total nitrogen and soil total phosphorus under different land uses in a small watershed on the Loess Plateau, China [J]. Geoderma, 2009, 150(1-2): 141-149
- [23] Cambardella C A, Moorman T B, Parkin T B, et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(5): 1501-1511
- [24] 张朝生, 章申, 何建邦. 长江水系沉积物重金属含量空间分布特征研究—地统计学方法 [J]. 地理学报, 1997, 52(2): 184-192 [Zhang Chaosheng, Zhang Shen, He Jianbang. Spatial dis-

- tribution characteristics of heavy metals in the sediments of Changji-nag River system – Geostatistics method[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1997, 52(2): 184 – 192]
- [25] 吴玉卫, 陈通权. 浙江省滨海盐土电导法测定全盐量的实验式[J]. *浙江农业大学学报*, 1981, 7(2): 125 – 128 [Wu Yuwei, Chen Tongquan. Empirical formulae for the determination of total salt content by electric conductivity of coastal saline soils in Zhejiang province[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural University*, 1981, 7(2): 125 – 128]
- [26] 刘广明, 杨劲松, 姚荣江. 影响土壤浸提液电导率的盐分化学性质要素及其强度研究[J]. *土壤学报*, 2005, 42(2): 247 – 251 [Liu Guangming, Yang Jingsong, Yao Rongjiang. Chemical factors to electrical conductivity of soil extract and their intensity [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(2): 247 – 251]
- [27] 李文庆, 李光德, 骆洪义. 大棚栽培对土壤盐分状况影响的研究[J]. *山东农业大学学报*, 1995, 26(2): 165 – 169 [Li Wenqing, Li Guangde, Luo Hongyi. Effect of greenhouse usage on soil salt [J]. *Journal of Shandong Agricultural University*, 1995, 26(2): 165 – 169]
- [28] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 38 [Chen Huaiman. *Environmental Soil Science* [M]. Beijing: Science Press, 2010: 38]

Spatial Distribution of Soil Salinity in the Mirabilite Area under the Humid Monsoon Climate Condition

ZHANG Junsu¹, XU Weiha^{1, 2}, YUAN Dagang¹, ZHANG Xiao¹, WANG Changquan¹

(1. College of Resource and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China;

2. Xinwen Bureau of Land and Resources, Sichuan Xinwen 644400, China)

Abstract: The feature-spatial distribution of the total water-soluble salt (TWSS), anion and cation in certain mirabilite area of Danling County, Sichuan, China was studied by ArcGIS and geostatistics in this paper. The results were as follows: The mean value of EC was 0.41 mS/cm, which ranged from 0.06 mS/cm to 2.38 mS/cm. The content of TWSS ranged from 0.48 g/kg to 5.93 g/kg; Predominant salts of anion in the soil were SO_4^{2-} and HCO_3^- , and predominant salts of cation were Ca^{2+} and Na^+ , which could be considered as a sulfate-soda-type. EC and TWSS had a significantly positive correlation, and they were affected by SO_4^{2-} , Ca^{2+} and Na^+ . What's more, EC, HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , Ca^{2+} , K^+ , Na^+ and TWSS had strong spatial correlations, Cl^- and Mg^{2+} had moderate spatial correlations, which revealed that EC, TWSS, HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , Ca^{2+} , K^+ and Na^+ were influenced by structural factors, and the spatial distributions of Cl^- and Mg^{2+} were the result of cooperation among structural factors and random factors. Spatial distribution of the TWSS had the trend that the value near the mirabilite area was higher than that of farther away from the mirabilite area. The high content areas of HCO_3^- , SO_4^{2-} , Mg^{2+} and Ca^{2+} were in the vicinity of the mirabilite area. The high content areas of EC and Na^+ not only in the vicinity of the mirabilite area but also appeared in the northern region. The contents of Cl^- and NO_3^- increased from south to north. According to the grading standards of salinization, sampling points which had salinized accounted for 44.23% of the total sampling points in the study area, and salinized soil areas accounted for 53.25% of the total areas, and appropriate measures should be taken to restore and control.

Key words: Mirabilite area; soil salinity; spatial distribution