

DOI: 10.5846/stxb201512042434

魏阳, 丁建丽, 王飞, 邹杰, 蔡亮红. 新疆玛纳斯流域非农业种植地盐碱性空间变异特征. 生态学报, 2016, 36(23): 7655-7666.

Wei Y, Ding J L, Wang F, Zou J, Cai L H. Analysis of the spatial variational characteristics of saline-alkaline soil types in non-agriculture land in Manas River Basin, Xinjiang, China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(23): 7655-7666.

新疆玛纳斯流域非农业种植地盐碱性空间变异特征

魏 阳, 丁建丽*, 王 飞, 邹 杰, 蔡亮红

新疆大学资源与环境科学学院, 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046

摘要: 土壤盐渍化是导致干旱区土地退化的主要原因之一, 也是影响干旱区可持续发展和环境改善的基本问题。充分挖掘不同分类体系下盐渍土空间变异性可以为实施开垦或恢复生态措施提供科学依据。以干旱区开垦近 50a 的玛纳斯流域为研究区, 在不同分类体系下, 以土壤盐度, pH 值, 离子类型为指标, 分析该区域非农业种植地(弃耕地, 盐碱地, 裸地, 沙地)盐渍土类型的空间分布特征。结果表明: (1) 研究区 68% 的样本属于非盐渍化, 不同类型的盐渍土主要以链状分布于泉水溢出带-冲积平原-干三角洲地带, 由南向北, 区域整体盐分大致遵循先升高后降低再升高趋势, 半方差函数分析土壤盐分呈现弱变异, 说明这种分布情况是受随机(人为)因素的影响; 而 pH 整体由南向北递增, 传统统计学和地统计学的分析结果都表明土壤碱化呈现中等变异, 受结构(自然)因素和随机(人为)因素的共同影响。表层土壤除在溢出带为氯化物型盐渍土外, 其他地区自南向北由硫酸-氯化物型逐渐变为氯化-硫酸盐型和硫酸盐土、苏打盐土, 离子的半方差函数拟合模型结果均是弱变异和中等变异, 与美国盐度实验室分类体系的变异性结果相同, 此类分布特征也是结构因素和随机因素共同作用的结果。(2) 分析五种典型地貌的盐渍土分布, 方差分析结果表明, 5 种地貌类型均呈现盐分表聚特征, 碱化度则由南向北递增; 其中盐碱特征最为显著的是泉水溢出带。泉水溢出带的盐土垂直方向的变化趋势为由表层至深层, 盐土类型由硫酸-氯化物盐土变为氯化盐土; 冲积平原和干三角洲样点处全剖面为氯化物-硫酸盐土, 冲积洪积扇和沙漠地区则包含所有阴离子盐土类型。对玛纳斯流域盐渍土特性的空间异质性进行分析, 可以为下一步有针对性地治理与改善土壤盐渍化提供科学依据。

关键词: 土壤盐度; 土壤碱性; 盐土类型; 空间变异

Analysis of the spatial variational characteristics of saline-alkaline soil types in non-agriculture land in Manas River Basin, Xinjiang, China

WEI Yang, DING Jianli*, WANG Fei, ZOU Jie, CAI Lianghong

College of Resources and Environment Science, Key Laboratory of Oasis Ecology of Ministry Education, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

Abstract: Soil salinization is one of the main causes of land degradation, and it affects both sustainable and environmental improvements in arid areas. In this study, we analyzed and exploited the spatial variability of saline-alkaline soil types in the study area under different currently popular saline-alkaline soil classification standards to obtain important information for land reclamation or restoration according to local conditions. The Manas River Basin, which was reclaimed nearly 50 years ago, was selected as the study area because it is a typical mountain-basin structure in western China. Soil properties (pH, soil salinity, and ions) were used as indicators to analyze the spatial characteristics of the distribution of different land-use types of non-agricultural land (abandoned farmland, salt-affected land, bare soil, and desert) with both statistical and geo-statistical methods. There were two popular classification standards used in this paper: The United States Salinity Laboratory classification and Russia Anion classification (1) With respect to surface soil (0-20 cm), 68% of the surface samples were

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1303381, 41261090, 41130531, 41161063; 41661046); 新疆维吾尔自治区青年科技创新人才培养工程资助项目(2013711014); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-12-1075); 新疆大学博士启动基金资助项目(BS150248)

收稿日期: 2015-12-04; **修订日期:** 2016-05-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: watarid@xju.edu.cn

non-saline soil, and different types of saline soils (slight, moderate, severe and extreme saline soils) classified by the first classification were distributed all over the overflow zone, alluvial plain, and dry delta areas. From south to north, soil salinity increased, decreased, and then increased. The variation in soil salinity was low and affected by random factors, while pH increased overall with moderate variations, affected by both random and structural factors. The types of ($\text{Cl}/\text{SO}_4^{2-}$) anion soil types were classified into four classes: the sulfate, chloride-sulfate, sulfate-chloride and chloride soils, while ($\text{CO}_3^{2-}/\text{SO}_4^{2-}$) anion soil types were classified into three classes: the sulfate-soda soil, soda soil and soda-sulfate soil. The surface anion soil of the overflow zone area was chloride soil; other anion soil types were from sulfate-chloride soil type to chloride-sulfate soil; sulfate soil, soda saline soil type, exhibited a normal distribution from south to north. The variation in anions was slight and moderate, which means that the influence of random and structural factors was the same as that described in The United States Salinity Laboratory classification. (2) One-way analysis of variance of the characteristics of the saline soil types was carried out for 0—100 cm soil layers in the five landscapes (alluvial fan, alluvial plain, overflow zone, dry delta, and desert) showed that the soil salt content accumulated over the surface, pH increased from south to north either, and the most significant landscape type was the overflow zone. The anion soil types in the vertical (from top to bottom) profile of the overflow zone landscape changed from sulfate-chloride type to chloride type, while the anion soil types of the alluvial plain and dry delta landscapes were chloride-sulfate type; other anion soil types were distributed over the alluvial fan and desert. This study of the spatial heterogeneity of saline-alkaline soil types will provide scientific guidance for government to manage soil resources.

Key Words: soil salinity; soil alkalinity; soil types; spatial variation

大陆性干旱气候的显著特点(降雨稀少和蒸发强烈)使得干旱区生态环境变得脆弱和敏感。随着人类活动的加强,土地退化、沙漠化、湖泊萎缩、湿地退化等生态恶化现象频频出现,由此引起的环境演变得到广泛关注。土壤盐渍化是干旱区典型的环境问题,新疆地处中国西北干旱区,地形封闭,母质含盐较高,已有 31.1% 的耕地呈现出盐渍化特征^[1],同时人为的重用轻养,使得全区出现较多的中低产田和弃耕地^[2],这种普遍的、严重的土壤退化现象制约了绿洲农业的发展。20 世纪 50 年代至今,土地资源和水资源的不合理利用导致的土壤盐渍化问题一直是该区的研究热点^[3-4]。

玛纳斯河流域作为新疆最大的绿洲农耕区,土壤盐渍化研究对本地具有生态和经济双重意义。诸多学者对玛纳斯河流域的土壤盐分的空间变化进行了研究,研究区集中于农田^[5],沙地^[6],弃耕地^[7],盐碱地^[8]等,研究内容主要涉及不同地类的土壤盐分含量、水盐运动及其空间变异特征,但这些研究多集中于田间尺度。据李均力等^[9]的研究,玛纳斯流域耕地继续扩张的潜力已经接近饱和,耕地扩张的重心逐渐由城市周边转向非农业种植地(弃耕地,盐碱地,裸地和沙地)。而这些区域盐渍土类型及其空间变异性研究还较少,若任其发展,本地的生态环境和经济发展将会受到进一步制约。

未来土地资源的开发与利用焦点均在未利用地的改良与治理方面。新疆是世界盐渍土的博物馆,由于独特的自然地理位置和干旱的气候条件,未利用地中盐渍土比例最大,还有因开发治理不当导致的土壤次生盐渍化现象,根据国内最严格的耕地保护政策和现今已有的盐渍土改良与治理研究成果,这些盐渍土都是本区可利用的丰富后备土地资源。新时代“一带一路”背景下的发展要求有足够的后备土地空间以支持本地经济发展,因此,选择研究非农用种植地盐渍土类型分布格局可以为盐渍化治理和预防提供参考依据,为土地资源的储备提供坚实基础。

世界各国盐渍土的形成条件、主要类型和盐碱特性具有地域性差异,因此分类标准也不完全一致。目前世界盐渍土划分研究普遍采用的是美国盐度实验室(The USDA Soil Salinity Laboratory)^[10]和俄罗斯学者 Plyusnin 和 Sokolov^[11]离子划分标准来区分盐渍土类型。这两种分类体系因其分类依据不同,一个宏观一个微观,在干旱区内陆河流域研究中复合使用可以起到信息互补的作用。本文在以上两种分类标准下,以玛纳

斯流域为研究区,采用半方差函数模型和单因素方差分析的方法研究非农业种植地典型地貌样点剖面的盐渍土空间变异特征,为后续因地制宜地进行盐渍土生物改良^[8,12],提高垦区农业灌溉水资源的利用率和生态环境良性循环及持续性发展提供开垦和管理依据。

1 研究区

研究区位于玛纳斯流域(44°23'21"—45°13'49"N,85°12'24"—86°33'43"E),此流域自 20 世纪 50 年代开发至今,新修建灌渠和水库,绿洲面积不断扩张,现已成为新疆开垦面积最大的人工绿洲,同时也是中国第 4 大灌溉农业区,是自治区最为重要的粮、棉、糖生产基地之一^[13]。玛纳斯流域位于新疆天山北麓,比邻准噶尔盆地南缘,地势南高北低。该区域为典型的山盆结构,由南向北,依次形成冲积洪积扇、冲积平原、泉水溢出带、干三角洲、沙漠等地貌特征。玛纳斯河是干旱区内陆河,本区是典型的大陆性干旱气候,年平均气温 6.8℃,年平均降水量和潜在蒸发量分别为 170 mm 和 1800 mm,不同地貌区域气候特征各有不同^[14]。土壤受地貌、气候、水文条件、植被及人为影响,类型多样,空间分布不均匀。土壤质地为沙土,沙壤土和中壤土。即自上游到下游,土壤质地由粗变细,地下水位由浅变深,矿化度由低变高,土壤盐渍化程度也由轻变重。自然植被群落结构通常表现为不连续的灌木层以及相对连续的草本层,形成典型的灌-草型二元结构群落^[8]。怪柳(*Tamarix ramosissima*)、盐穗木(*Halostachys caspica*)及白刺(*Nitraria sibirica*)是该区的建群种,猪毛菜(*Salsola* spp.)分布广泛且为此区域的优势种,同时伴生芦苇(*Phragmites australis*)、琵琶柴(*Reaumuria soongonica*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)等。

2 研究方法

2.1 样品采集与分析

以研究区土壤类型、灌区图及实际考察作为参考,综合考虑土壤质地、植被类型、地貌特征和土地利用方式等因素,结合 Google 地图和高分辨率卫图进行规则布点,保证样点具有可达性,获取采样点坐标输入 GPS 进行野外采样导航。个别样点根据采样实地情况进行了调整,采样点分布如图 1 所示。采样时间为 2012 年 7 月 20 日至 8 月 10 日,共采集 216 个有效样点的土壤样品。在每个采样点用土钻进行分层取样,采样垂直间隔为 0—20、>20—40、>40—60 cm 和 >60—100 cm,每个土层连续取样。同时记录采样点周围的地形地貌、植被类型、植被覆盖、灌溉方式、管理模型等信息。

将野外样点不同剖面采集的铝盒土壤带回实验室,参照《土壤农业化学分析方法》进行分析。将采集的土壤样品经过自然风干、磨碎、过 2 mm 筛后备用。所有样品均制备 1:5 土水质量比浸提液,利用 DDSJ308A 型电导率仪测定电导率值。对土壤 pH 值、钠、钾、钙、镁、氯、硫酸根、碳酸根、碳酸氢根等盐离子含量进行测定,其中:Ca²⁺、Mg²⁺用 EDTA 络合滴定法测定;K⁺、Na⁺用火焰光度法测定;HCO₃⁻、CO₃²⁻用双指示剂滴定法测定;Cl⁻用标准 AgNO₃滴定法测定;SO₄²⁻用 EDTA 络合滴定法测定;pH 值用酸度计测定;土壤盐分含量采用离子总和法计算。

2.2 盐渍土分类标准及数据处理

关于土壤盐渍化分类标准,国内外普遍采用的分类方法是美国农业部土壤盐度实验室^[10]根据土壤饱和

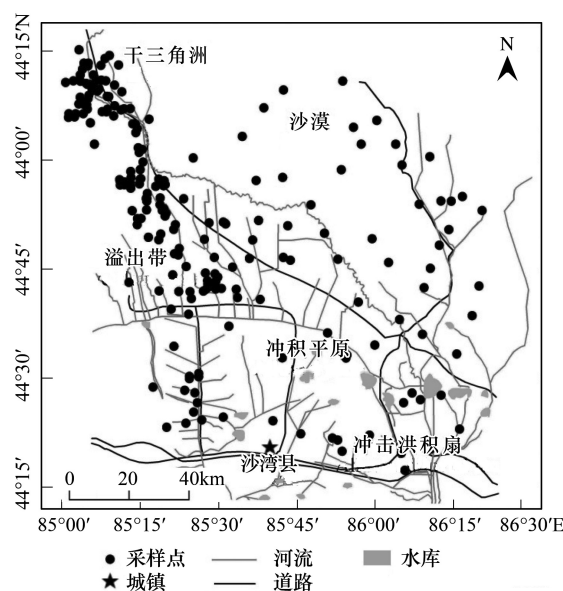


图 1 玛纳斯流域采样点分布图

Fig.1 Distribution of soil samples in Manas River Basin

浸提液电导率(EC_e)、碱化度(ESP)和 pH 值对土壤盐渍化程度进行划分的分类方法。这种分类系统可以从宏观上把握土壤盐渍化的空间分布特征。俄罗斯学者 Plyusnin 和 Sokolov^[11]根据阴离子比值区分盐土类型,能够在不同土壤盐渍化区域内进一步识别土壤所含盐离子对土壤环境是否有害。此分类体系根据阴(阳)离子毫克的当量比和阴阳离子结合所形成的化合物来确定具体的土壤盐分类型。目前,中国的部分研究学者采用此分类标准,运用综合数值分析或者主组元聚类分析的统计方法进行土壤盐渍化分级^[15],也都取得了较好的效果。两种分类体系见表 1。

由于土壤存在于一个整体的自然环境中,考虑到土壤理化性质地理空间位置的自相关性,需要结合地统计学的方法来定量描述土壤属性的区域分布和变化趋势,故采用半方差函数拟合模型分析其空间变异性。数据计算分析均在 SPSS 22 软件中进行,半方差函数^[16]计算在 GS+9.0 软件中进行,对所有参与计算数据进行预处理和对数变换使其符合正态分布,避免出现比例效应。地貌类型土壤理化性质分析采用单因素方差分析,数据通过显著性检验后再进行多重比较分析。利用 ArcGIS 9.3 绘制样点土壤盐渍土类型空间分布图。

表 1 盐渍土分类体系
Table 1 Classification system of saline soil

分类体系 Classification system		土壤类型 Soil types	分类依据 Basis of classification
美国土壤盐度实验室分类体系 Classification system based on USDA soil salinity laboratory	盐碱特性划分 Classification based on saline-alkali property	盐土 碱土 盐碱土 非盐非碱土	$EC_e > 4\text{ ds/m}$, $ESP < 15\%$, pH 值 < 8.5 $EC_e < 4\text{ ds/m}$, $ESP > 15\%$, pH 值 > 8.5 $EC_e > 4\text{ ds/m}$, $ESP > 15\%$, pH 值 > 8.5 $EC_e < 4\text{ ds/m}$, $ESP < 15\%$, pH 值 < 8.5
	盐渍化程度划分 Classification based on soil salinization degrees	非盐渍化 轻度盐渍化 中度盐渍化 重度盐渍化 极度盐渍化	$EC_e < 2\text{ ds/m}$ $EC_e\ 2\text{ ds/m}—EC_e\ 4\text{ ds/m}$ $EC_e\ 4\text{ ds/m}—EC_e\ 8\text{ ds/m}$ $EC_e\ 8\text{ ds/m}—EC_e\ 16\text{ ds/m}$ $EC_e > 16\text{ ds/m}$
离子分类体系 Classification system based on anion of salt types	按阴离子(Cl^-/SO_4^{2-})划分 Classification based on (Cl^-/SO_4^{2-})	硫酸盐土 氯化物-硫酸盐土 硫酸盐-氯化物盐土 氯化物盐土	$SO_4^{2-} > 5\text{ mg/kg}$ SO_4^{2-} 为主要离子且 $> 5\text{ mg/kg}$, Cl^- 为次要离子 Cl^- 为主要离子且 $> 5\text{ mg/kg}$, SO_4^{2-} 为次要离子 $Cl^- > 5\text{ mg/kg}$
	按阴离子(CO_3^{2-}/SO_4^{2-})划分 Classification based on (CO_3^{2-}/SO_4^{2-})	苏打盐土 硫酸-苏打盐土 苏打-硫酸盐土	$CO_3^{2-} > 5\text{ mg/kg}$ CO_3^{2-} 为主要离子且 $> 5\text{ mg/kg}$, SO_4^{2-} 为次要离子 SO_4^{2-} 为主要离子且 $> 5\text{ mg/kg}$, CO_3^{2-} 为次要离子

EC_e 为电导率 electrical conductivity of saturation extract, ESP 为碱化度 exchangeable sodium percentage; 分类方法依据文献^[10-11]; 本研究中盐碱特性分类主要依据 pH 值和 EC_e 数据

3 结果与分析

3.1 土壤盐渍化统计分析

玛纳斯流域不同深度 pH 值、电导率及离子含量统计特征值如表 2 所示。研究区不同剖面深度盐碱度的特征参数均表现出明显差异性。整个研究区剖面 pH 值域范围 6.12—10.76, 平均值为 8.91, 表明研究区土壤偏碱性, 碱性随着土壤深度的增加而增强。电导率值最小值为 0.003 ds/m , 最大值为 18.19 ds/m , 剖面平均值为 1.61 ds/m , 土壤盐度偏向非盐渍化, 0—20 cm 和 $> 40—60\text{ cm}$ 土壤电导率呈轻度降低趋势, 而 $> 60—100\text{ cm}$ 土壤电导率值轻度回升, 表明研究区土壤盐分呈表聚和底聚并存态势。

整个研究区土壤剖面 0—100 cm 主要离子含量中, Na^+ 含量最高, 这与研究区灌溉用水有关, 渠水多含钙,

井水多含钠,阴离子以 SO_4^{2-} 或 Cl^- 为主^[17],其中 Na^+ 质量分数接近 64%,为该区域主要的阳离子类型。 Cl^- 和 SO_4^{2-} 为主要的阴离子组分,各土层中 CO_3^{2-} 的含量均较低,大部分土壤样品中未能检测出。各样点土壤随着剖面深度的增加, CO_3^{2-} 和 Mg^{2+} 的含量呈轻度增加, Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 Na^+ 含量先减后增, Ca^{2+} 和 K^+ 轻度减少,而 HCO_3^- 含量无明显变化。

表 2 玛纳斯流域不同深度 pH 值、电导率及离子含量统计特征值

Table 2 Descriptive statistic values of sampled soil of pH and electrical conductivity and anion content at different depths in Manas River Basin

深度 Depth/cm	pH			电导率 Electrical conductivity /(ds/m)			CO_3^{2-} 含量 CO_3^{2-} content /(g/kg)		
	范围 Range	平均值±标准差 Mean±Standard deviation.	变异系数 Coefficient of variation	范围 Range	平均值±标准差 Mean±Standard deviation.	变异系数 Coefficient of variation	范围 Range	平均值±标准差 Mean±Standard deviation.	变异系数 Coefficient of variation
0—20	6.98—10.68	8.83±0.76	0.58	0.0041—18.19	1.71±2.47	6.14	0—0.0086	0.0007±0.0015	0
>20—40	6.12—0.6	8.91±0.81	0.66	0.003—16.22	1.54±2.05	4.19	0—0.01	0.0008±0.0019	0
>40—60	7.04—10.76	8.95±0.82	0.67	0.0038—16.4	1.53±2.05	4.2	0—0.02	0.0009±0.0022	0
>60—100	6.98—10.64	8.96±0.82	0.67	0.0039—16.82	1.69±2.41	5.82	0—0.01	0.0009±0.002	0

深度 Depth/cm	HCO_3^- 含量 HCO_3^- content /(g/kg)			Cl^- 含量 Cl^- content /(g/kg)			SO_4^{2-} 含量 SO_4^{2-} content /(g/kg)		
	范围	平均值±标准差	变异系数	范围	平均值±标准差	变异系数	范围	平均值±标准差	变异系数
0—20	0—0.55	0.05±0.07	0.01	0.0005—24.77	0.85±2.55	6.52	0.0012—5.36	0.51±1.07	1.15
>20—40	0—0.55	0.05±0.07	0.01	0.0009—10.22	0.64±1.72	2.95	0.0006—8.33	0.46±1.11	1.24
>40—60	0—0.55	0.05±0.07	0.01	0.0004—19.08	0.66±2.02	4.09	0.0032—13.85	0.47±1.26	1.59
>60—100	0—0.34	0.05±0.06	0.01	0.0004—23.64	0.94±2.88	8.27	0.002—7.35	0.5±1.13	1.27

深度 Depth/cm	Ca^{2+} 含量 Ca^{2+} content /(g/kg)			Mg^{2+} 含量 Mg^{2+} content /(g/kg)			K^+ 含量 K^+ content /(g/kg)			Na^+ 含量 Na^+ content /(g/kg)		
	范围	平均值±标准差	变异系数	范围	平均值±标准差	变异系数	范围	平均值±标准差	变异系数	范围	平均值±标准差	变异系数
0—20	0.01—4.6	0.51±0.56	0.31	0.0037—2.45	0.11—0.22	0.05	0.0007—1.34	0.09±0.11	0.01	0.03—49.5	3.99±4.73	22.41
>20—40	0.0021—2.82	0.47±0.55	0.29	0.0011—2.09	0.11—0.19	0.04	0.002—0.4	0.07±0.07	0.01	0.05—12.75	3.03±2.94	8.63
>40—60	0.01—2.54	0.44—0.52	0.27	0.0008—1.18	0.1—0.16	0.03	0.001—1.37	0.06±0.11	0.01	0.02—12.9	3.27±2.99	8.97
>60—100	0.0067—2.84	0.43—0.52	0.27	0.0041—1.09	0.13—0.18	0.03	0.0003—0.35	0.06±0.07	0.01	0.05—12.45	3.5±2.93	8.58

3.2 盐渍土空间分布特征及分析

根据美国农业部土壤盐渍化实验室设计的盐度分级体系,以表层 0—20 cm 土壤样本为例,如图 2a 中所示,基于土壤的全盐量,68%的样点为非盐渍化类型,轻度盐渍化占 12.5%,13.4%的样点为中度盐渍化,重度盐渍化和极度盐渍化各占 5%和 1.1%。非盐渍化土和轻度盐渍化土在全区多以面状分布,中度盐渍化土以链状形式分布于冲积平原末端及干三角洲,而重度及极度盐渍化土以点状形式分布于冲积平原末端交错带处。基于土壤的盐碱特性,区域内 58%的样点属于偏碱性,32%的样点为非盐非碱性土壤,6%的样点为盐碱土类型,4%为盐土类型。根据以上统计结果得知,区内土壤偏碱性,整体盐渍化程度不高,空间分布如图 2b 所示,非盐碱土主要分布冲积平原农业灌溉区,盐土以点状分布于冲积平原末端,碱土主要分布于研究区北部,干三角洲和沙漠区域,而盐碱土以点状分布于水库周围和沙漠地区。

对研究区土壤盐碱属性进行变异性分析结果见表 3,EC 和 pH 值的拟合模型为球状模型和高斯模型, R^2 为 0.51 和 0.98,残差较小,说明模型拟合效果较好可以用来解释空间变异。二者空间结构比分别为 94%和 63%,其中 EC 呈弱空间自相关性,说明区域内土壤盐度的变异主要是人为因素(如耕作、管理方式等)导致的;pH 呈中等程度的空间自相关性,说明其变异是由人为因素和结构因素(成土母质、地形、气候等自然因素)共同作用的结果,并且两者的作用近乎等价,因此可以得出区域内土壤呈现的盐碱累积空间特征大多是人类活动引起的。EC 和 pH 空间变程为 33.50 m 和 66.51 m,表示 EC 在短距离内具有相似性,而 pH 在中等距离范围内具有相似性,超过此范围则不存在相关性。因此在相似范围之内需要结合不同尺度、地形地貌和土壤盐离子沉积运动迁移特点来进一步分析盐碱分布特征。

以表层 0—20 cm 土壤样本为例,计算 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 的半方差函数模型,它们的拟合模型分别为指数、高斯、球状、球状模型, R^2 较高,残差很小。其中 SO_4^{2-} 拟合效果最好, R^2 为 0.74, CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 的 R^2 均在 0.6 以上,且数值相差不大。从变程来看, $\text{CO}_3^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$, 分别为 64.2、32.56、6.91 m 和 4.06 m,因此可以从小尺度范围研究土壤盐离子的空间变异情况。从空间结构比来看, $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{CO}_3^{2-}$, Cl^- 和 SO_4^{2-} 空间结构比大于 75%,运移变化主要由随机因素引起,主要受人为因素影响; CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 空间结构比大于 25% 小于 75%,以中等变异为主,说明区域内苏打类盐土的空间连续性较好,与土壤偏碱性结论(表 2)一致,其变化多受人为因素影响,因此需要优化排灌、脱盐设施,降低本地土壤碱性,防止次生盐渍化现象进一步恶化。

表 3 土壤属性半方差函数模型及相关参数

Table 3 Characteristic parameters of semi-variance of the spatial variation of soil properties

要素 Soil property	模型 Models	块金值 Nugget	基台值 Sill	空间结构比 Proportion	R^2	残差 Residual	变程 Range/m
pH	Gaussian	0.00	0.01	0.63	0.98	0.00	66.51
EC	Spherical	0.09	1.41	0.94	0.51	0.92	33.50
CO_3^{2-}	Exponential	0.22	0.43	0.50	0.62	0.01	64.20
HCO_3^-	Gaussian	0.10	0.26	0.63	0.63	0.01	32.56
Cl^-	Spherical	0.23	1.30	0.83	0.63	0.03	4.06
SO_4^{2-}	Spherical	0.00	1.96	0.99	0.74	0.04	6.91
Ca^{2+}	Exponential	0.04	0.10	0.65	0.61	0.00	18.60
Mg^{2+}	Gaussian	0.73	1.74	0.58	0.81	0.33	35.16
Na^+	Exponential	0.29	2.32	0.88	0.62	0.24	9.00
K^+	Gaussian	0.70	1.40	0.50	0.77	0.09	152.59

Gaussian 为高斯模型, Spherical 为球状模型, Exponential 为指数模型

整个研究区的地势是南高北低,山脉河流走向均依地势和地形变化,南部地区多为山区地貌,水源补给来自于高山冰雪融水和山地降水,处于河流源发区,水资源充足。由于地壳构造运动,由南向北,依次形成了复杂的冲积扇、平缓的冲积平原和溢出带、干三角洲和沙漠 5 种地貌单元,因此影响到流域土壤水分的整体布局。南部和中部地区水资源来源于山区储量丰富,导致土壤整体含水量高;加上土壤质地粗,植被类型丰富,地下水位较浅矿化度低,因此土壤盐离子之间互相吸附、交换活动频繁,区域内土壤盐分累积程度不高,盐渍化程度以非、轻度盐渍化为主。此外,20 世纪 80 年代末期开始进行大规模绿洲水土开发活动,实行井灌井排、合理利用地下水资源,提高灌水利用率及控制地下水位,从而降低了土壤次生盐渍化的危害^[9]。因此,中部和南部地区仅少数局部地区因地质原因,出现中重度盐渍化。研究区北部降水量少,蒸发量高,且处于河流下游,水储量少;粘土和沙土分布广泛,结构疏松,土壤水分不易贮存;同时受中上游排灌、脱盐活动的影响,部分地区尤其沙漠边缘积盐强烈,进一步抬升此地的盐碱度^[18],因此北部整体盐渍化程度比南部高。

参照离子分类体系,研究本区盐渍土类型的时空分布特征,其分布情况如图 2 所示。以阴离子($\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$)比例来分,氯化物-硫酸盐土和硫酸盐-氯化物盐土均匀分布于全区,且由图 3 可知,研究区盐土类型主要以氯化物-硫酸盐和硫酸盐-氯化物为主,二者比例相当。其次为硫酸盐和氯化物,后者比例较少。硫酸盐土以条带状分布于研究区南部洪积冲积扇,北部干三角洲和沙漠区域,氯化盐土以斑点状分布于冲积平原末端交错带处。以阴离子($\text{CO}_3^{2-}/\text{SO}_4^{2-}$)比值划分类型而言,全区苏打盐土占多数,硫酸盐-苏打盐土仅以极小比例出现于干三角洲、交错带和研究区南部河流出口处。由图 3 得知,全区样点不同深度所占的比例具有较高的稳定性,各层土壤盐渍化整体水平较低、碱化度高,各层土壤中 0—20 cm 层盐碱含量最高,硫酸-氯化物盐土和苏打盐土比例最高,不同分类体系下各层盐碱土类型比例变化波动不大,与前面描述性统计结果一致。这种分布情况与离子的吸附、溶解、沉淀有关, Cl^- 、 SO_4^{2-} 易溶解析出,较为活跃,且与 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等阳离子进行结合易形成各种氯化盐土和硫酸盐土。 Cl^- 、 Ca^{2+} 更容易随水分子迁移至土壤深层(>40—60 cm 和 >60—

100 cm),进一步加重该区整体的盐渍化程度。而硫酸盐溶解度小,在土壤中迁移慢,容易滞留表层^[19],因此表层(0—20 cm)土壤的盐渍化程度较为严重。 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 属于微溶和难溶离子,与其他阳离子结合易形成沉淀物,因此苏打盐土遍布全区。

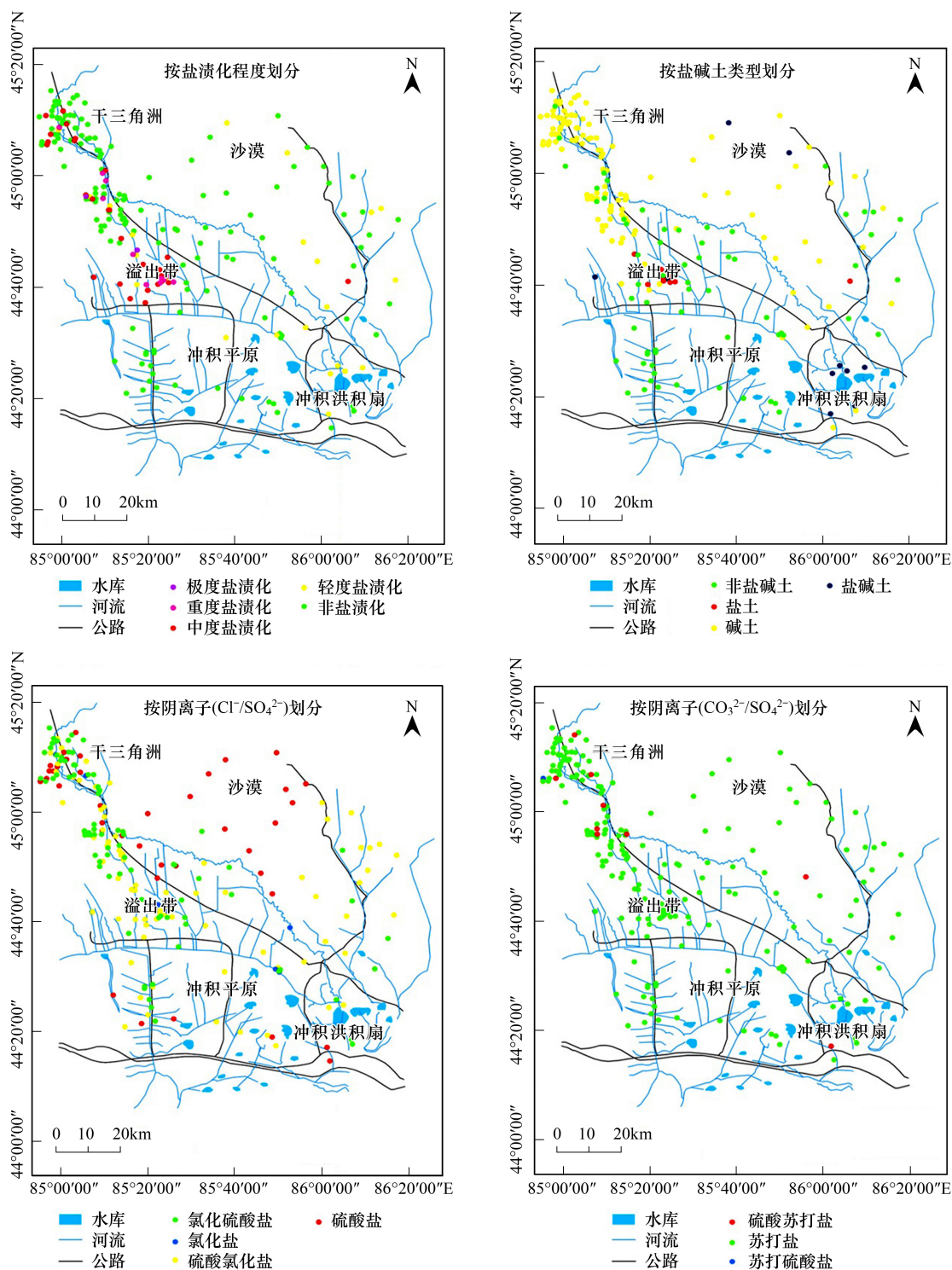


图2 不同盐土类型空间分布图

Fig.2 Spatial distribution of different saline soil types

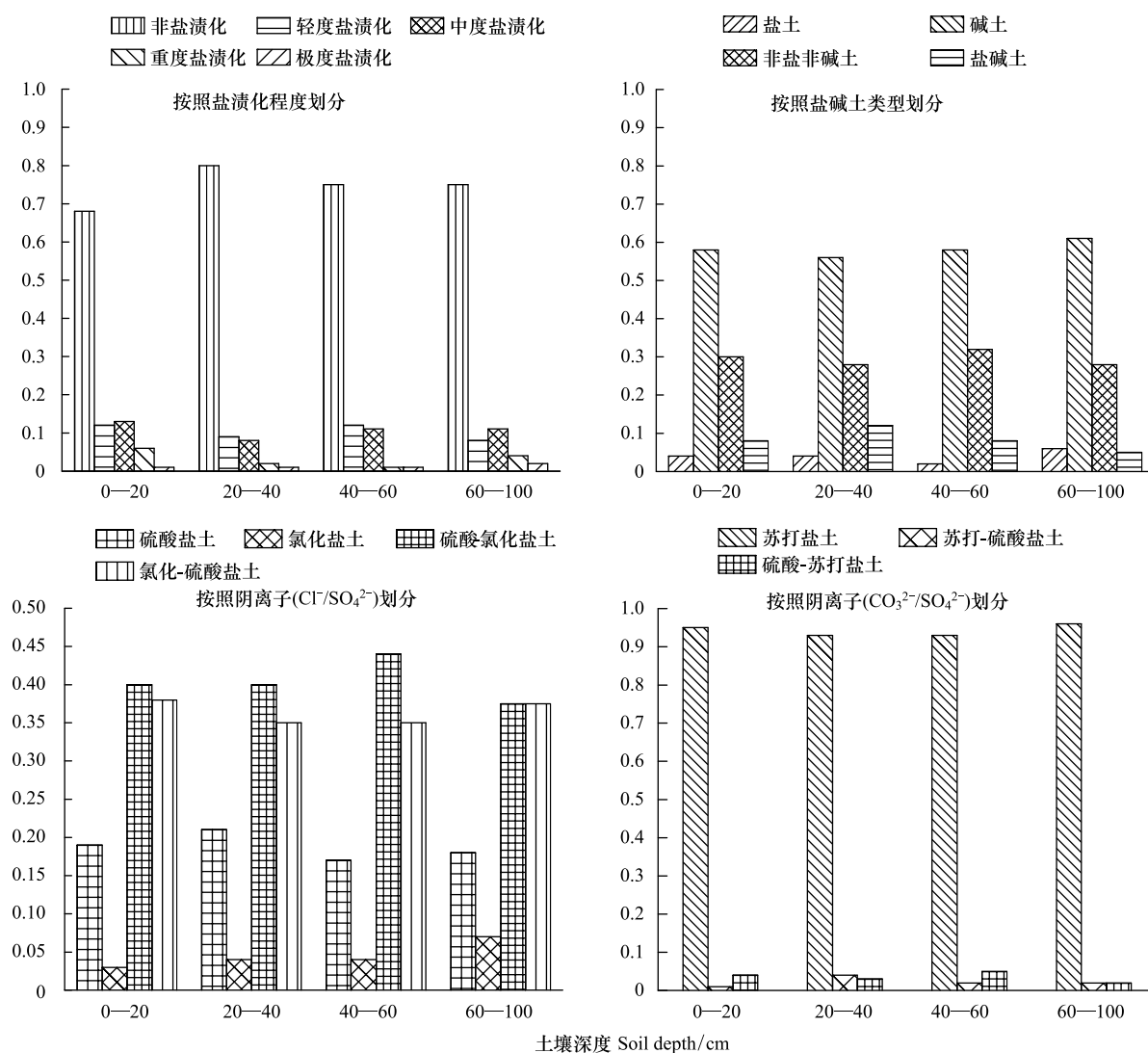


图3 不同土壤深度盐土类型比例统计

Fig.3 Ratio statistics of saline soil types at different soil depths

3.3 典型地貌土壤剖面盐碱特征分析

依照南高北低的山盆结构和河流走向,结合实地考察和研究资料,选取冲积洪积扇、平原中部、溢出带、干三角洲、沙地 5 种具有代表性的典型地貌分析其剖面盐碱特征。玛纳斯流域典型地貌位置土壤理化性质如表 4 所示。

5 种地貌类型之间表层电导率没有显著性差异,而其它层之间差异显著。电导率最大值为 5.85 (中度盐渍化),出现于溢出带 0—20 cm 处,最小电导率为 0.21,分布于干三角洲 >60—100 cm 处。溢出带 (轻、中度盐渍化) 和沙漠 (轻度盐渍化) 整体 EC 值较高,说明其土壤含盐量较高,干三角洲 (非盐渍化) 和冲积平原 (非盐渍化) 则与上者情况相反。pH 值在 0—100 cm 各层均大于 7,说明研究区土壤偏碱性,最大值为 9.74,出现在沙漠 >40—60 cm 处,最小值为 7.87,出现在溢出带 >60—100 cm 处。干三角洲和沙漠整体 pH 水平较高且与其他 3 类地貌之间差异性显著,冲积洪积扇 pH 整体水平较低;各地貌之间 pH 均值差异性较为明显。溢出带区整体 Cl^- 、 SO_4^{2-} 含量最高,且与其他 4 类地貌的差异性最明显;冲积平原的 SO_4^{2-} 相对较高,其他 3 种地貌类型 SO_4^{2-} 均值没有明显差异,干三角洲和沙漠地区 CO_3^{2-} 整体含量较高。依据表 1 中的阴离子分类体系比值关系得到,冲积洪积扇盐土类型主要以硫酸盐土和苏打盐土为主,冲积平原主要为硫酸盐土,溢出带大部分是

氯化盐土和硫酸盐土,而干三角洲和沙漠地区主要为硫酸盐土和苏打盐土。

表 4 玛纳斯流域典型地貌剖面土壤特性

Table 4 Comparison of saline soil properties at different soil profiles in different topographic positions in Manasi River Basin

属性 Soil property	土层深度 Soil depth	地貌类型 Landscape				
		冲积洪积扇 Alluvial fan	冲积平原 Alluvial plain	溢出带 Overflow zone	干三角洲 Dry delta	沙漠 Desert
含水量 Water content	0—20	14.48±3.67a	15.58±1.4a	7.55±2.96b	8.71±5.98ab	8.91±4.35ab
	>20—40	12.91±5.50ab	18.82±1.18a	10.43±5.25ab	10.89±7.33ab	13.20±2.90b
	>40—60	16.00±2.79b	21.64±2.30ac	10.57±6.74b	10.37±8.75ab	14.56±4.15b
	>60—100	16.21±2.65b	23.85±1.56ac	12.79±7.63abc	11.42±8.94abc	13.89±3.10b
EC	0—20	1.00±0.53a	0.30±0.21a	5.85±3.73a	0.40±0.36a	2.66±2.00a
	>20—40	0.79±0.3b	0.28±0.20c	4.31±1.91a	0.23±0.22c	3.45±2.58ab
	>40—60	1.11±0.65b	0.28±0.25b	4.27±1.28a	0.26±0.24b	2.48±2.31ab
	>60—100	0.82±0.40b	0.31±0.25b	3.92±1.08a	0.21±0.20b	2.43±2.03ab
pH	0—20	7.88±0.16c	8.025±0.41bc	8.41±0.29b	8.72±0.68a	9.63±0.45a
	>20—40	7.95±0.24d	8.07±0.41bd	8.04±0.59c	9.01±0.73ab	9.56±0.26a
	>40—60	8.00±0.22b	8.33±0.704b	7.94±0.45b	9.04±0.79ab	9.74±0.25a
	>60—100	8.01±0.10bc	8.63±1.09abc	7.87±0.75b	9.18±0.71a	9.67±0.26a
CO ₃ ²⁻	0—20	0.00±0.00a	0.00±0.00a	0.00±0.00a	0.002±0.00a	0.00±0.00a
	>20—40	0.00±0.00a	0.00±0.00a	0.00±0.00a	0.00±0.00a	0.00±0.00a
	>40—60	0.00±0.00a	0.00±0.00a	0.00±0.00a	0.00±0.00a	0.00±0.00a
	>60—100	0.00±0.00a	0.00±0.00a	0.00±0.00a	0.00±0.00a	0.00±0.00a
HCO ₃ ⁻	0—20	0.02±0.02b	0.00±0.00c	0.25±0.06a	0.02±0.00b	0.04±0.02b
	>20—40	0.02±0.01cd	0.00±0.00d	0.24±0.03a	0.03±0.01bc	0.02±0.01bc
	>40—60	0.02±0.02bc	0.00±0.00c	0.26±0.08a	0.03±0.01b	0.02±0.01b
	>60—100	0.02±0.01c	0.00±0.00d	0.24±0.03a	0.01±0.01bcd	0.02±0.01bc
Cl ⁻	0—20	0.14±0.11b	0.07±0.04b	4.46±1.23a	0.30±0.35b	0.07±0.15b
	>20—40	0.16±0.22b	0.04±0.02b	4.53±1.79a	0.40±0.50b	0.06±0.12b
	>40—60	0.11±0.06a	0.04±0.03a	7.01±6.09a	0.20±0.22a	0.08±0.11a
	>60—100	0.16±0.18b	0.05±0.03b	5.52±2.89a	0.14±0.15b	0.14±0.19b
SO ₄ ²⁻	0—20	0.22±0.07b	0.81±0.54b	4.04±0.54a	0.29±0.23b	0.13±0.04b
	>20—40	0.20±0.06b	0.66±0.90b	3.95±0.52a	0.16±0.17b	0.11±0.06b
	>40—60	0.25±0.10b	0.05±1.00b	3.44±0.39a	0.17±0.19b	0.10±0.07b
	>60—100	0.26±0.11b	0.28±1.11b	3.62±0.62a	0.10±0.09b	0.10±0.07b
Ca ⁺	0—20	0.48±0.36a	1.02±0.38a	1.82±1.41a	0.34±0.39a	0.38±0.37a
	>20—40	0.57±0.58ab	0.92±0.35ac	0.88±0.21a	0.11±0.10b	0.35±0.30bc
	>40—60	0.47±0.41a	0.74±0.51a	1.17±0.79a	0.17±0.29a	0.41±0.26a
	>60—100	0.82±0.72ab	0.67±0.61ab	1.05±0.52a	0.05±0.02b	0.24±0.19ab
Mg ²⁺	0—20	0.15±0.14a	0.12±0.08a	1.07±0.71a	0.03±0.02a	0.05±0.04a
	>20—40	0.11±0.08bc	0.13±0.07bc	0.91±0.60ab	0.02±0.02ad	0.13±0.24bc
	>40—60	0.12±0.09b	0.12±0.08b	0.83±0.26a	0.02±0.02b	0.04±0.03b
	>60—100	0.14±0.15b	0.13±0.07b	0.713±0.24b	0.02±0.01b	0.17±0.27a
Na ⁺	0—20	0.21±0.13ad	1.81±0.56bc	2.30±0.44bc	8.90±7.87ab	3.63±2.66ab
	>20—40	0.16±0.08ad	1.53±0.84bc	2.34±0.49bc	5.73±5.59ab	4.56±3.55ab
	>40—60	0.19±0.14ad	1.63±0.81bc	2.72±0.80bc	5.34±5.00ab	4.48±2.78ab
	>60—100	0.16±0.08ad	2.08±0.40bc	2.59±0.53bc	4.75±4.16ab	4.63±2.38bc
K ⁺	0—20	0.03±0.02b	0.04±0.02ab	0.08±0.08ab	0.10±0.09ab	0.17±0.08a
	>20—40	0.03±0.02a	0.03±0.02a	0.04±0.04a	0.07±0.06a	0.19±0.11a
	>40—60	0.02±0.01a	0.03±0.03a	0.03±0.02a	0.05±0.05a	0.14±0.10a
	>60—100	0.02±0.02a	0.03±0.03a	0.02±0.01a	0.03±0.04a	0.13±0.10a

同行不同小写字母表示不同地貌类型下各项指标差异显著 ($P<0.05$)

从表 4 可以得知,冲积洪积扇处剖面 pH 值从表层到底层逐渐增高。该处地下水位 3—5 m,矿化度为

1 g/L^[18], 水位高。同时, 采样点位于出山口, 高矿化度的高山雪融水, 进一步推高该地的土壤 pH 值。剖面 >40—60 cm 处 EC 达到最大值, 原因是盐穗木和猪毛菜为此地优势种, 两者为积盐植物, 在生长过程中根部吸收大量的盐离子(例如 Na⁺)并贮藏在体内^[20]。据曹国栋等^[8]的研究, >0—60 cm 处根部盐分在植物生长期逐渐增加, 到植物凋败期达到最大积盐, 底层 >60—100 cm 土壤含盐量则较低, 且随植物生长有脱盐趋势, 等到二者死亡或凋落物降落到地表时, 体内盐分释放, 导致其覆盖下的土壤无论 pH 值还是全盐量都达到较高水平。

冲积平原中部剖面为氯化物-硫酸盐型, 盐分呈现表层和底层较高而中层低的特征。pH 值随深度增加而增大, 至 >60—100 cm 处达到最大, 这与 Zhao 等^[20]的研究结果一致。同时, 样点处以多年生草本植物芦苇为主, 通过对试验条件下人工种植芦苇的耐盐性研究, Matsushita^[21]发现芦苇一定程度限制了 Na⁺从根部向地上部转移, 其根系在土壤中交错分布, 对于土壤通透性改善十分有利, 同时研究表明芦苇覆盖土壤各层含盐量均处于较低水平。冲积平原是五种典型地貌中面积最大的地貌单元, 是生活、生产活动的主要聚集地, 除了考虑自然环境影响外, 人为影响因素是首要考虑的因素。农业生产抽取地下水, 以大水漫灌的方式对土壤进行脱盐淋洗, 同时修建排盐排碱水利工程等措施, 人为改变盐分的上下运移进程。本区地下水位低于 4 m^[22]相对较深, 受灌溉淋洗作用, 盐分多聚集于底层; 冲积平原地势平坦, 地表水流动平缓, 加之不时出现水资源布局不合理的现象发生, 局部地区表层土壤易发生盐分累积现象。此处受人为影响较大, 同时地下水位深浅不稳定, 因此常年呈现脱盐积盐交替状态。

溢出带表层 0—20 cm 为氯化物-硫酸盐土, >20—100 cm 为氯化型土壤。溢出带剖面 pH 值自表层至底层逐渐减小, 剖面土壤盐度呈表聚型, 随着深度增加而减小。溢出带地下水位低于 2 m^[22], 埋深较浅。此处为荒漠交错带, 地形呈波状起伏。此处地下水多以泉水的形式, 通过岩间罅隙涌出地面, 是地下水转变为地表水的过渡带。该地成土母质矿化度较高, 因此地下水的矿化度也相对较高。土壤中 Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、K⁺整体含量高且与其他地貌类型差异显著。区域内盐离子随水势活跃在各个土层之中, 底层盐离子随水分强势上移至土壤表层, 而表层的土壤盐离子的淋洗下渗活动相对较弱。因此 Cl⁻、HCO₃⁻多积聚于 >40—60 cm 土层。

干三角洲全剖面为氯化物-硫酸盐型, 该地 pH 值大于 7, 且在 >40—100 cm 处达到最大值, 土壤呈碱化现象明显, 剖面土壤盐分较其他地貌而言, 相对含量较小, 且波动甚微。干三角洲地区降水相对较少, 地下水埋深 3—5 m^[22], 南部高山融水形成的地表径流多用于冲积平原中部灌溉区, 到此处的土壤水分骤减, 使得此区土壤含水量整体较低, 表层至底层呈现递减趋势。同时此区临近沙漠, 土质偏沙, 纤弱的毛管作用无力顶托水分上移。另外, 此处生长着泌盐植物如怪柳、白刺, Na⁺含量在 5 种地貌中含量最高且多积聚于表层。根据程凡等^[23]的研究, 流域末端和沙漠边缘区域地下水化学类型为 HCO₃⁻-SO₄²⁻—Na 型, 本研究结果与其一致, 此区土壤 SO₄²⁻比例较高。原因在于干三角洲位于河流下游, 毗邻沙漠, 平原排盐渠道通向沙漠边缘, 春季洪水充溢河道, 其边缘与沙漠交接处积盐强烈, 而河道两岸地势相对低洼的地带分布着残余盐土和盐化草甸盐土, 盐分离子高度浓缩, 进一步抬升盐碱值^[18]。

沙漠地区表层为硫酸盐土, 随着土壤深度增加, 土壤盐土类型趋向于氯化物型。沙漠地下水位大于 4 m^[22], 埋深相对较深, 土壤质地偏沙, 透水储水性差, 盐离子的上下运移速度缓慢, 运移规律为自表层向底层渗透, 因此土壤盐分为底聚, 沙地剖面 Na⁺离子含量相对较高, 且 pH 值随深度增加而增大, 这与盐生怪柳的泌盐特性有关, 其凋落物呈碱性^[24], 茎叶腐殖质提升了土壤的 pH 值。

4 结论

基于不同的分类标准, 对玛纳斯流域非农业种植地土壤盐渍化空间异质性进行分析, 得出以下结论:

(1) 参照美国盐度实验室的分类体系, 得到区域盐土分布情况: 表层 0—20 cm 土壤整体呈现非盐渍化(样本量约占 68%), 轻度盐渍化、中度盐渍化和重度盐渍化土壤以链状分布各分布于冲积洪积扇-溢出带-干三角洲; 碱土分布情况: 全区碱土和非盐非碱土占大多数, 主要分布在冲积平原区, 盐碱土和盐土呈点状分布

于冲积洪积扇缘和溢出带,碱土主要分布在溢出带、干三角洲和沙漠地区。从离子类型分类体系进行研究分析得知,氯化物-硫酸盐土和硫酸-氯化物盐土全区都有分布,前者分布于冲积洪积扇和河流下游,后者分布于泉水溢出带;硫酸盐土分布于研究区南部冲积扇,氯化盐土分布于溢出带(点状);苏打盐土分布于全区(占总样本量的 96%)。对其变异性进行分析,EC 是弱变异 pH 是中等变异,表明上述盐碱分布特征大多是由人为因素引起的。 Cl^- 和 SO_4^{2-} 弱变异 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 是中等变异,进一步说明盐离子运移是由人为因素引起的,因此进一步按典型地貌对盐碱变异性进行分析。

(2) 各个典型地貌不同剖面盐土类型多样,对其盐碱属性进行方差分析。方差分析结果表明,溢出带最为典型,其他地貌各离子之间差异性不显著。溢出带盐碱程度最高,各离子含量高,盐分表聚,氯化盐土和硫酸盐土为主,盐土类型由表层硫酸-氯化物盐土至深层氯化盐土变化。冲积洪积扇以硫酸盐土和苏打盐土为主,剖面盐分大致呈现表聚和底聚特征。冲积平原全剖面为氯化物-硫酸盐土,冲积平原盐分的累积状况受人为影响大,剖面盐分呈表聚和底聚并存态势。干三角洲样点处全剖面为氯化物-硫酸盐土,盐分以表聚为主。沙漠地区碱化度最高,垂直变化趋势由表层硫酸盐土至深层氯化盐土变化。

综合描述土壤不同盐分类型空间异质性,比仅利用单一分类研究结果描述更为全面,美国盐度实验室分类体系能够快速从宏观上整体把握土壤盐渍化分布特征,离子分类体系则可在前者分类内部进行更为具体的描述,从微观上描述盐土离子特征。两类体系在干旱区内陆河流域研究中并不矛盾或冲突,内容上互为补充,在具体工作中可以复合使用。依据前文传统统计学和地统计学综合研究的研究成果,后续可以针对特定区域开展不同盐渍化土壤的改良和治理开发工作,为改善生态环境和提高土地经济效益提供有益参考。

致谢:感谢中国科学院新疆生态与地理研究所罗格平研究员和石河子大学生物工程学院王绍明教授提供的室内实验基础数据资料。

参考文献 (References):

- [1] 新疆维吾尔自治区农业厅. 新疆土壤. 北京: 科学出版社, 1996: 304-336.
- [2] 田长彦, 周宏飞, 刘国庆. 21 世纪新疆土壤盐渍化调控与农业持续发展研究建议. 干旱区地理, 2000, 23(2): 177-181.
- [3] Jia B Q, Zhang Z Q, Ci L J, Ren Y P, Pan B R, Zhang Z. Oasis land-use dynamics and its influence on the oasis environment in Xinjiang, China. *Journal of Arid Environments*, 2004, 56(1): 11-26.
- [4] Luo G P, Zhou C H, Chen X, Li Y. A methodology of characterizing status and trend of land changes in oases: a case study of Sangong River watershed, Xinjiang, China. *Journal of Environmental Management*, 2008, 88(4): 775-783.
- [5] 沈浩, 吉力力·阿不都外力. 玛纳斯河流域农田土壤水盐空间分布特征及影响因素. 应用生态学报, 2015, 26(3): 769-776.
- [6] 曾晓玲, 刘彤, 张卫宾, 孙钦明, 沈雪莹, 司朗明. 古尔班通古特沙漠西部地下水位和水质变化对植被的影响. 生态学报, 2012, 32(5): 1490-1501.
- [7] 朱宏伟, 夏军, 曹国栋, 王绍明, 张霞, 王进. 盐渍化弃耕地土壤盐分动态及其影响因素. 土壤, 2013, 45(2): 339-345.
- [8] 曹国栋, 陈接华, 夏军, 朱宏伟, 蒋永超, 张霞, 王绍明. 玛纳斯河流域扇缘带不同植被类型下土壤物理性质. 生态学报, 2013, 33(1): 195-204.
- [9] 李均力, 姜亮亮, 包安明, 常存, 白洁, 刘海隆. 1962—2010 年玛纳斯流域耕地景观的时空变化分析. 农业工程学报, 2015, 31(4): 277-285.
- [10] Richards L A. Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils. Agriculture Handbook No. 60. Washington, DC: US Department of Agriculture, 1954.
- [11] Plyushnin I I. Reclamative Soil Science. Moscow: Foreign Languages Publishing House, 1964.
- [12] 李兵, 梁静, 张风华, 刘广明. 干旱区盐渍化弃耕地不同恢复模式植被多样性及土壤生物学特性. 排灌机械工程学报, 2014, 32(9): 814-821.
- [13] 禹朴家, 徐海量, 乔木, 周生斌, 刘世薇. 玛纳斯河流域土壤类型空间分布格局分析. 土壤学报, 2010, 47(6): 1050-1059.
- [14] 杨学涛, 李品芳, 侯振安, 范远. 玛纳斯河流域不同地貌单元弃耕地土壤盐分差异研究. 土壤学报, 2012, 49(6): 1241-1246.
- [15] 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培, 黎立群. 中国盐渍土. 北京: 科学出版社, 1993: 132-132.

- [16] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, Parkin T B, Karlen D L, Turco R F, Konopka A E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(5): 1501-1511.
- [17] 刘春卿, 杨劲松, 陈小兵, 刘广明. 新疆玛纳斯河流域灌溉水质与土壤盐渍状况分析. *土壤*, 2008, 40(2): 288-292.
- [18] 张风华, 赵强, 潘旭东, 李玉义. 新疆玛河流域绿洲土壤特性空间分异与合理开发模式. *水土保持学报*, 2005, 19(6): 53-56.
- [19] 王让会, 宁虎森, 赵振勇, 张慧芝. 绿洲土壤水盐耦合关系及景观地球化学特征. *南京信息工程大学学报*, 2009, 1(2): 97-101.
- [20] Zhao C Y, Wang Y C, Song Y D, Li B G. Biological drainage characteristics of alkalized desert soils in north-western China. *Journal of Arid Environments*, 2004, 56(1): 1-9.
- [21] Matsushita N, Matoh T. Characterization of Na⁺ exclusion mechanisms of salt-tolerant reed plants in comparison with salt-sensitive rice plants. *Physiologia Plantarum*, 1991, 83(1): 170-176.
- [22] 王海江. 玛纳斯河流域土壤盐渍化过程和格局特征及盐渍土改良模式探讨[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- [23] 程凡, 李巧, 周金龙, 王新中. 玛纳斯河流域典型地区地下水质量现状评价与变化趋势分析. *新疆农业大学学报*, 2014, 37(3): 254-258.
- [24] Titus J H, Nowak R S, Smith S D. Soil resource heterogeneity in the Mojave Desert. *Journal of Arid Environments*, 2002, 52(3): 269-292.