

开都河下游灌区土壤盐渍化特征分析

李新国^{1,2}, 樊自立³, 李会志^{1,2}, 任云霞^{1,2}

(1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 新疆 乌鲁木齐 830054; 2. 新疆干旱区湖泊环境与资源实验室, 新疆 乌鲁木齐 830054; 3. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 以开都河下游灌区为研究区, 在野外考察与样品实验分析的基础上, 研究绿洲土壤盐渍化各特征值空间分布规律, 运用相关分析和回归分析方法研究该绿洲土壤盐渍化特征之间的耦合关系。结果表明: 土壤 pH 值的平均值大于 8.0, 属于微碱性土壤; 土壤含盐量较高, 0~10 cm 土层中的含盐量最大, 平均值达到 2.83%; 土壤阳离子主要以 Na^+ 、 K^+ 和 Mg^{2+} 为主, 土壤阴离子主要以 SO_4^{2-} 和 Cl^- 为主; 土壤含盐量与电导率、TDS 之间正相关; 通过统计分析表明, 土壤溶液电导率和 TDS 的值可以直接反映土壤含盐量的大小。

关键词: 土壤盐渍化; 土壤特征; 土壤含盐量; 开都河下游灌区

中图分类号: S153.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2011)02-0147-05

土壤盐渍化是荒漠化和土地退化的重要类型。土壤的盐渍化问题和灌溉引起的土壤次生盐渍化问题成为制约干旱区农业发展的主要障碍, 也是影响绿洲生态环境稳定的重要因素, 始终是干旱区可持续发展和改善环境质量的战略问题^[1]。土壤盐渍化既涉及资源问题和生态环境问题, 又与农业可持续发展息息相关, 它与人类活动, 特别是农业灌溉密切相关^[2,3]。我国干旱区盐渍化土地资源丰富, 种类繁多, 其中新疆是世界盐碱土的博物馆^[4]。据全国第二次土壤普查资料, 全国盐渍化耕地面积 $9.21 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 占耕地面积的 6.62%; 新疆等西部 6 省区盐渍化耕地面积 $3.45 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 占 6 省区总耕地面积的 13.93%; 其中以新疆耕地盐渍化最为严重, 约 $1.26 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 占新疆耕地面积的 30.58%。新疆后备耕地资源面积 $9.51 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 其中盐渍化土地面积达 $5.56 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 占后备耕地总面积的 58.49%^[5]。因此, 无论从提高当前干旱区绿洲土地利用率和耕地单位面积总量, 还是扩大后备可耕地面积, 土壤盐渍化始终是主要的限制因素。

开都河下游灌区是开都河流域的一部分, 是干旱区典型的人工绿洲^[6]。由于地理位置和水土资源的优越性, 灌区成为当地主要的农牧业基地。由于灌区主要水源来自北部和西北部, 流经中生界、新生界含盐地层, 并且距离博斯腾湖较近, 致使灌区内原生盐渍化较为普遍, 加之水资源不合理的分配与利用不当, 造成了大面积潜在的次生盐渍化^[7]。据调查资料^[8], 灌区内耕地中不同程度的土壤盐渍化面

积占 15%~30%, 在荒地中各种类型的盐渍化土地面积大于 70%。因此, 针对该区域土壤盐渍化问题进行分析, 可以为干旱区绿洲区域盐渍化土地的管理、合理利用以及因地制宜地精准改良以及保障干旱区绿洲社会经济的可持续发展, 提供一定的理论参考和实践依据。

1 研究区概况

开都河下游灌区位于新疆焉耆盆地, 行政区域上包括和静县、焉耆县、博湖县及新疆生产建设兵团农二师 22 团、23 团、24 团、25 团、27 团和 223 团, 地理位置为 $85^\circ 42' \sim 88^\circ 00' \text{ E}$, $41^\circ 35' \sim 42^\circ 30' \text{ N}$ 。开都河是惟一能常年补给博斯腾湖的最大一条河流, 其下游段(大山口水电站到博斯腾湖入湖口), 河流长度为 171 km。下游灌区的地面海拔高度一般在 1 050~1 200 m, 地势西北高东南低。灌区属南北疆过渡的大陆荒漠性气候, 气候特征表现为热量充足, 日照长, 降水稀少, 蒸发强烈, 年平均气温 $8.0^\circ \text{C} \sim 8.6^\circ \text{C}$, $\geq 10^\circ \text{C}$ 的积温 $3 414.4^\circ \text{C} \sim 3 694.1^\circ \text{C}$, 无霜期 176~200 d; 年平均降水量 50.7~79.9 mm, 蒸发量为 2 000.5~2 449.7 mm; 土壤类型主要有棕漠土、草甸土、沼泽土、灌耕潮土、盐土、风沙土等; 区内地下水资源较为丰富, 地下水可开采量为 $9.05 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 地下水位多在 1.0~2.0 m^[9]。地下水化学特征具有较强的地带性分异规律, 山前冲积—洪积平原为低矿化的重碳酸型水, 过渡到冲积平原的中上部为重碳酸—硫酸盐型, 滨湖地区则为硫酸盐—氯

收稿日期: 2010-10-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41061025); 自治区高校科研计划青年教师科研基金项目(XJEDU2009S69)

作者简介: 李新国(1971—), 男, 甘肃玉门市人, 博士, 副教授, 主要从事干旱区资源环境及其遥感应用研究。

化物型水;在河流水网密集的区域,潜水受地表水的淡化作用明显,地下水化学组成复杂^[10]。

2 材料与方法

2.1 样品采集与预处理

本研究以 2008 年陆地卫星 ETM 7、4、1 波段合成的遥感图像为参考图辅助进行野外调查和选点,采用 GPS 定位技术,使采样点尽可能遍及灌区范围内主要的土地利用类型,而且尽可能使样点分布规则,且能代表各盐渍度等级。采样时间为 2009 年 10 月 5~7 日,该时段土壤盐分表聚过程基本上稳定;土壤剖面分三层取样(0~10 cm、10~30 cm、30~50 cm),共采集样点 46 个,土样 138 份。每个样点用 GPS 精确定位,获取点位经纬度;通过土壤水分速测仪 TZS 测量样点土壤水分;并视实地表面特征均匀程度,采集周围 3 个点(样点分布范围为 50 m×50 m 内)土壤混合为一个土样装入采样袋,带回实验室进行理化分析;实地记录样点土壤表面状况、地貌类型、植被类型等景观描述;土壤样品自然风干后,剔除土壤以外的植物根系等杂质,适当磨细,过 1 mm 孔径筛,充分混匀,装入容器待用。

2.2 室内样品分析测试

对所有采集样品分别取 50 g 风干土与 250 ml 蒸馏水混合,经过浸泡和振荡使土壤盐分充分溶解后,进行土壤盐分及其组分测定。pH 值(水土比 2.5:1)采用 L P115PHMeter 酸度计法测定; CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 采用双指示剂中和法测定; Cl^- 采用 AgNO_3 滴定法测定; SO_4^{2-} 采用 EDTA 间接滴定法测定; Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 采用 EDTA 络合滴定法测定; Na^+ 和 K^+ 采用差减法;采用 Orion 115A⁺仪器测定浸提液 25℃ 时的电导率(mS/cm)、含盐量(%)、TDS (Total Dissolved Solids 的缩写,即溶解性总固体,mg/L);用残渣烘干法直接测定样品盐分总量。

2.3 数据处理

针对研究区土样化学分析结果,利用 SPSS 统计软件和 EXCEL 进行数据处理。通过采用最大值、平均值、最小值、标准差、方差等 5 项统计指标值,了解研究区土壤总体盐分状况及土样盐分分级;通过相关分析,了解各盐分组成之间关系的密切程度;通过回归分析,确定土壤盐分及组成之间的函数关系。

3 结果分析

3.1 土壤盐分离子含量及组成

从表 1 可以知道,土壤盐分离子类型多样,且不同采样深度的土壤中离子的含量存在差异,反映了

盐分来源和影响因素的多样性。土壤 pH 值的平均值均大于 8,根据酸碱分级标准,土壤酸碱度呈微碱性,并随着采样深度的增加,pH 值的平均值减少;土壤盐分组成中阴离子主要为 SO_4^{2-} 和 Cl^- ,阳离子主要为 Mg^{2+} 和 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$,而 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 的含量相对较少;从表 1 可以知道,随着采样深度依次增加,各种盐分离子的含量依次减少,即 0~10 cm 土层各种盐分子浓度最大,10~30 cm 土层各种盐分子浓度次之,30~50 cm 土层各种盐分子浓度最小,其中 0~10 cm 土层中 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 和 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 平均浓度值均大于 1.00%,分别是 10~30 cm 土层中相应离子平均浓度值的 1.14、1.11、1.03 和 1.16 倍,分别是 30~50 cm 土层中相应离子平均浓度值的 3.02、8.43、3.57 和 4.51 倍,表明 0~10 cm 土层中 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 和 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 平均浓度高于 10~30 cm 土层中相应离子平均浓度,但相差并不明显;而 0~10 cm 土层中 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 和 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 平均浓度与 30~50 cm 土层中相应离子平均浓度相差极其显著,土壤盐分离子在三层呈现 T 型分布 0~10 cm>10~30 cm>30~50 cm,盐分表聚强烈。

在研究区一些样点的土壤表面可以明显观察到一层约 0.5 cm 的盐霜,甚至有 1.0~5.0 cm 左右的盐壳。可以初步得出,土壤表层盐分离子的运动趋势以表聚为主,很少淋洗脱盐过程,这与该地特殊的气候如干旱少雨、蒸发强烈等条件因子有密切的关系。

对土壤化学分析结果进行统计分析,如表 2 所示,0~10、10~30 cm 和 30~50 cm 土层盐分含量平均值分别为 2.83%、1.08%和 0.45%,土壤盐分含量在三层呈 T 型分布 0~10 cm>10~30 cm>30~50 cm,而与含盐量密切相关的电导率和 TDS 也呈现相同变化趋势。

3.2 土壤盐渍化等级划分

依据新疆土壤盐渍化程度分级指标^[3],将土壤含盐量作为一个确定土壤盐渍化程度的主要指标,将研究区 46 个采样点分为 5 个等级,即非盐渍化、轻度盐渍化、中度盐渍化、重度盐渍化、和盐土(表 3)。从表 3 可知,各级别采样点个数分布说明,所采的样本具有一定的代表性;灌区内土壤盐渍化主要为氯化物—硫酸盐型,占 47.83%,其次为硫酸盐型占 32.61%,硫酸盐—氯化物盐型占 13.04%,氯化物盐型所占比例最小,为 6.52%。

灌区所在的焉耆盆地四周山区富含钠盐,山前带的第三纪和侏罗纪岩层富含石膏等可溶性盐分,为灌区土壤盐渍化的形成提供了物质条件。由于盐

渍化土壤盐分组成与成土母质的类型和成分有密切的联系,经过风化的成土母质通过水流把含盐地层的盐分带到灌区,使地表水和地下水的矿化度逐渐增高,成为灌区土壤盐分的主要来源。

表 1 土壤盐分组分统计值
Table 1 Statistics of chemical composition of salt-affected soil

采样深度 Sampling depth	统计值 Statistical value	HCO ₃ ⁻ (%)	Cl ⁻ (%)	SO ₄ ²⁻ (%)	Ca ²⁺ (%)	Mg ²⁺ (%)	K ⁺ +Na ⁺ (%)	pH
0~10 cm	最大值 Maximum	0.081	6.390	8.208	0.414	6.469	8.155	9.930
	最小值 Minimum	0.017	0.016	0.283	0.002	0.052	0.005	8.147
	平均值 Average value	0.045	1.130	1.983	0.143	1.338	1.678	8.725
	标准差 Standard deviation	0.018	1.872	2.386	0.140	1.818	2.452	0.462
	方差 Variance	0.000	3.504	5.694	0.020	3.304	6.011	0.213
10~30 cm	最大值 Maximum	0.247	5.725	9.960	0.300	6.879	8.900	9.648
	最小值 Minimum	0.027	0.005	0.370	0.017	0.044	0.193	7.891
	平均值 Average value	0.085	0.989	1.794	0.125	1.299	1.444	8.463
	标准差 Standard deviation	0.075	1.776	2.942	0.106	2.152	2.643	0.553
	方差 Variance	0.006	3.156	8.657	0.011	4.633	6.987	0.306
30~50 cm	最大值 Maximum	0.104	0.740	1.930	0.248	1.448	1.734	9.440
	最小值 Minimum	0.022	0.003	0.288	0.011	0.047	0.008	7.124
	平均值 Average value	0.042	0.134	0.657	0.086	0.375	0.372	8.326
	标准差 Standard deviation	0.020	0.167	0.434	0.074	0.354	0.379	0.502
	方差 Variance	0.000	0.028	0.188	0.005	0.126	0.144	0.252

表 2 土壤盐渍化特征统计表
Table 2 Statistics of salt-affected soil characteristics

采样深度 Sampling depth	统计值 Statistical value	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Average value	标准差 Standard deviation	方差 Variance
0~10 cm	电导率 Conductivity(ms/cm)	151.70	0.36	46.32	47.67	2272.43
	含盐量 Salt content(%)	8.32	0.02	2.83	2.94	8.64
	TDS (mg/L)	175837.26	123.00	31081.37	38737.62	1500603203.26
	含水量 Water content(%)	19.06	0.52	6.87	4.65	21.62
10~30 cm	电导率 Conductivity(ms/cm)	95.37	0.19	16.20	21.58	465.70
	含盐量 Salt content(%)	6.77	0.01	1.08	1.54	2.37
	TDS (mg/L)	59283.37	81.00	9352.41	13347.32	178150951.18
	含水量 Water content(%)	19.68	0.61	12.34	4.39	19.27
30~50 cm	电导率 Conductivity(ms/cm)	44.82	0.27	7.72	7.67	58.83
	含盐量 Salt content(%)	2.96	0.01	0.45	0.47	0.22
	TDS (mg/L)	27628.43	127.00	4146.23	4476.64	20040305.69
	含水量 Water content(%)	20.73	0.68	13.67	4.93	24.30

3.3 相关性分析

通过对各离子之间的相关性分析,可以揭示土壤盐分在土体中的存在形态以及与盐分间相关性,可在一定程度上反映出盐分的运动趋势和形成原因。以 0~10 cm 土层为例,通过 Pearson 相关分析,结果表明(表 4):K⁺与 Mg²⁺、HCO₃⁻有较显著的正相关;Na⁺与 Cl⁻有显著正相关;Mg²⁺与 SO₄²⁻、HCO₃⁻有较显著的正相关,尤其是 Na⁺与 Cl⁻、Mg²⁺

与 SO₄²⁻之间的相关系数均大于 0.8,说明氯化物与硫酸盐在表土中积聚强烈;盐分以向上运行为主。
通过 Pearson 相关分析,结果表明(表 5):电导率、含盐量和 TDS 三者之间正相关关系极为显著,相关系数均达到 0.90 以上;pH 值与电导率、含盐量、含水量之间呈负相关;含水量与电导率、含盐量呈正相关。

表 3 土壤盐渍化等级划分
Table 3 The classes of the soil salinization

盐渍化类型 Salinization type	样点数/个 Sampling numbers					占总样点 比例(%) Percentage of total
	非盐渍化 Non-salinization	轻盐渍化 Light salinization	中度盐渍化 Moderate salinization	重盐渍化 Severe salinization	盐土 Saline soil	
氯化物型 Chloride type	1	1	1	0	0	6.52
硫酸盐—氯化物型 Sulfate—chloride type	1	1	1	1	2	13.04
氯化物—硫酸盐型 Chloride—sulfate type	5	5	4	4	4	47.83
硫酸盐型 Sulfate type	4	3	3	3	2	32.61
占样点总数的% Percentage of total	23.91	21.74	19.57	17.39	17.39	—

表 4 0~10 cm 土层盐分离子相关分析矩阵
Table 4 Matrix of the correlation coefficients of salt ion for 0~10 cm soil layer

变量 Variable	pH	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl [−]	SO ₄ ^{2−}	HCO ₃ [−]	含盐量 Salt content
pH	1.00								
K ⁺	0.04	1.00							
Na ⁺	−0.07	0.02	1.00						
Ca ²⁺	0.14	−0.12	0.24	1.00					
Mg ²⁺	0.21	0.71	−0.13	0.05	1.00				
Cl [−]	−0.07	0.13	0.98	0.25	0.22	1.00			
SO ₄ ^{2−}	0.34	0.39	−0.07	0.27	0.81	0.02	1.00		
HCO ₃ [−]	0.22	0.73	−0.11	−0.16	0.65	−0.01	0.26	1.00	
含盐量 Salt content	0.10	−0.03	−0.04	−0.07	0.09	−0.02	−0.03	−0.12	1.00

表 5 特征值相关分析矩阵
Table 5 Matrix of the correlation coefficients

变量 Variable	电导率 Conductivity	含盐量 Salt content	TDS	pH	含水量 Water content
电导率 Conductivity	1.00				
含盐量 Salt content	0.99 **	1.00			
TDS	0.91 *	0.91 **	1.00		
pH	−0.34	−0.32	−0.20	1.00	
含水量 Water content	0.31	0.32	0.27	−0.33	1.00

注: ** 表示在 0.01 水平下相关显著(双尾检验); * 表示在 0.05 水平下相关显著(双尾检验)。
Note: ** means correlation is significant at the level of 0.01 (t testing); while * means correlation is significant at the level of 0.05 (t testing).

3.3 回归分析

对采样点土壤电导率和含盐量进行回归分析(图 1A),可知电导率与含盐量的回归模型拟合优度效果很好,相关系数 R^2 达到 0.9978。因此,可得出电导率和含盐量的回归模型表达式: $y=0.0658x+0.0282$,模型经回归显著性检验($\alpha=0.05$),回归效果良好。

通过回归分析(图 1B),可以看出 TDS 与含盐量之间拟合效果很好,相关系数 R^2 达到 0.9725,模型经回归显著性检验,回归效果显著($\alpha=0.05$),因此,本区 TDS 与含盐量之间回归表达式为: $y=9E-05x+0.1207$ 。通过回归分析,还发现土壤 pH 值、含水量与含盐量回归关系不显著,相关系数 R^2 小于 0.2(图 1C、图 1D)。

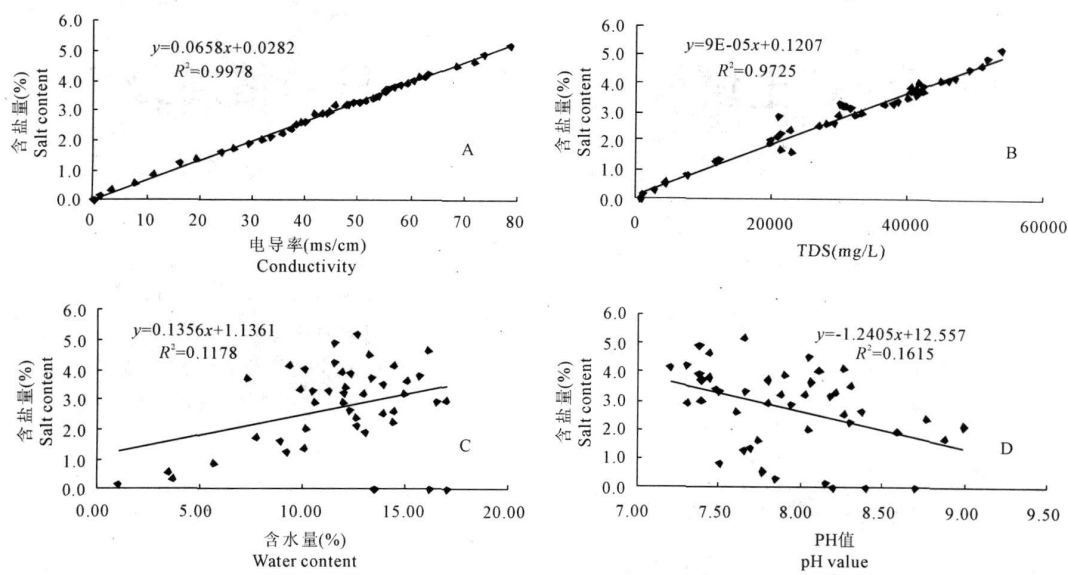


图 1 电导率、TDS、pH 值和含盐量的回归分析图

Fig.1 The regression analysis of conductivity, TDS, pH, water content and salt content

4 结 论

1) 土壤盐分含量在三层呈 T 型分布 0~10 cm>10~30 cm>30~50 cm,盐分表聚强烈,而与含盐量密切相关的电导率和 TDS 也呈现相同变化趋势,但 pH 值在三层变化并不显著。

2) 通过对各特征值的 Pearson 相关分析,结果表明:电导率、含盐量、TDS 三者之间正相关,相关系数均大于 0.90,关系极显著。

3) 通过用电导率、TDS 对含盐量进行回归分析,结果表明:电导率、TDS 与含盐量回归模型拟合效果良好,相关系数 R^2 分别为 0.9978 和 0.9725,土壤溶液电导率和 TDS 的值可以直接反映土壤含盐量的大小。

参 考 文 献:

[1] 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[J]. 干旱区地理, 2000, 23(2): 176—181.

[2] 程水英,李团胜. 土地退化的研究进展[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(3): 38—43.

[3] 乔 木,田长彦,王新平. 新疆灌区土壤盐渍化及改良治理模式[M]. 乌鲁木齐:新疆科学技术出版社, 2008: 1—11.

[4] 王遵亲,祝寿泉,俞仁培,等. 中国盐渍土[M]. 北京:科学出版社, 1993: 37—41.

[5] 樊自立. 盐渍土和盐渍化[C]//秦大河. 中国西部环境演变评估. 北京:科学出版社, 2002: 86—91.

[6] 夏 军,左其亭,邵民诚. 博斯腾湖水资源可持续利用[M]. 北京:科学出版社, 2003: 21—25.

[7] 王玉宝,李 涛. 浅析新疆焉耆盆地土壤次生盐渍化治理途径[J]. 水文地质工程地质, 2004, (6): 99—101.

[8] 陈曦. 中国干旱区土地利用与土地变化[M]. 北京:科学出版社, 2008: 385—392.

[9] 卢 丹. 新疆焉耆盆地水土资源可持续利用[D]. 北京:中国地质大学, 2007: 17—22.

[10] 刘延锋,靳孟贵,金英春,等. 新疆焉耆盆地土壤盐渍化特征分析[J]. 水土保持通报, 2004, 2(1): 51—54.

(英文摘要下转第 158 页)

Study on spatial variability and patterns of soil salinity in the Ili River Valley

Gulnar •Tohtia^{1,2}, Hamid •Yimit¹, Mihrigul •Mamat^{1,2}, Zulpiya •Mamat^{1,2}

(1. Key Lab of Oasis Ecology, Ministry of Education, Urumqi, Xinjiang 830046, China;

2. College of Resources & Environment Sciences, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China)

Abstract: The spatial variability of soil salinity in different soil layers, in the Ili River Valley as an example, was quantificationally analyzed by means of GPS and GIS technology, based on the regionalized variable theory, using the semivariograms and the Kriging method of geostatistics. The results showed that the semivariograms of soil salinity in 0~20 cm, 20~40 cm and 60~80 cm fitted the spherical model while the semivariograms of soil salinity in 40~60 cm fitted the Gause model. The autocorrelation range of soil salinity in different soil layers had apparent differences, and the autocorrelation range of soil salinity increased from the top layer to the deeper ones. Analysis of the spatial patterns of soil salinity indicated that high values of soil salinity were mainly distributed on the lower-lying areas. On the vertical direction, the salinity of surface soil (0~20 cm) was the highest and it decreased gradually with the increase of soil depth.

Keywords: geostatistics; soil salinity; spatial variability; Kriging method; the Ili River Valley

(上接第 151 页)

Analysis on the characteristics of soil salinization in the downstream of Kaidu River Irrigation Areas, Xinjiang

LI Xin-guo^{1,2}, FAN Zi-li³, LI Hui-zhi^{1,2}, REN Yun-xia^{1,2}

(1. School of Geographic Sciences and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi, Xinjiang 830054, China;

2. Xinjiang Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone, Urumqi, Xinjiang 830054, China;

3. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: Soil salinization is one of primary environmental problems in the sustainable development in the downstream of Kaidu River Irrigation Areas in Xinjiang. Based on field survey, GPS location and soil analysis, soil salinization levels and distribution are investigated, and the characteristics of soil salinization in different spatial changes were analyzed. Using the analysis of correlation and regression to study the relations between the soil compositions, the results showed that the lands in the area are mostly of alkali soil with pH value greater than 8.0 and high in salt content, and salts content rate mostly in the 0~10 cm surface layer, it accounts for 2.83%. Dominated cations in the soil are Na⁺, K⁺ and Mg²⁺, whereas anions in the soil are SO₄²⁻ and Cl⁻ in the 0~10 cm soil layers. The correlation between Na⁺ and Cl⁻ content is positive and extremely significant, between K⁺ and HCO₃⁻ content significantly positive. All these findings further suggest that the soils are heavy chloride saline soils. The correlation between salt content and conductivity and TDS are positive significant. Regression analysis indicted: the level of soil salinization is indicted by the conductivity and TDS.

Keywords: soil salinization; soil characteristics; soil salt content; the downstream of Kaidu River Irrigation Areas