

干旱区典型绿洲水库库周土壤盐分空间分异及盐岛效应

柴晨好^{1,2,3} 王玉刚^{1,2*} 周宏飞^{1,2} 朱薇^{1,2,3} 刘丽娟^{1,2}

(¹中国科学院新疆生态与地理研究所, 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011; ²中国科学院阜康荒漠生态系统国家站, 新疆阜康 831505; ³中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 绿洲水库作为干旱区内陆河流域的典型水系节点, 在区域农业发展中占有重要地位。为了认识农区水库对土壤盐分空间分布特征的影响, 本文以三工河流域的冰湖水库和柳城子水库为例, 运用经典统计分析、地统计分析和 GIS 相结合的方法, 对比分析不同景观背景下, 以水库为中心的区域土壤剖面(0~60 cm)盐分的空间变异特征。结果表明: (1) 以自然景观为背景的柳城子水库各土层盐分含量(0~20 cm: 20.77 g·kg⁻¹, 20~40 cm: 14.96 g·kg⁻¹, 40~60 cm: 16.9 g·kg⁻¹) 高于灌溉景观为主导背景的冰湖水库各土层盐分含量(0~20 cm: 7.81 g·kg⁻¹, 20~40 cm: 5.66 g·kg⁻¹, 40~60 cm: 5.24 g·kg⁻¹)。在土壤盐分变异性上, 冰湖水库各土层盐分的变异系数 CV>100%, 均呈现强变异性, 而柳城子水库呈现出中等变异性(10%<CV≤100%); (2) 两个水库区域各层土壤盐分, 均呈现中等强度空间自相关性(0.25<C₀/(C₀+C)<0.75), 冰湖水库表层土壤盐分空间变异主要受人为活动产生的随机因素影响, 但随着土层深度的增加结构性因素的影响逐渐增强, 而柳城子水库土壤盐分空间变异主要受结构性因素主导; (3) 农业水库区域呈现出“盐岛”效应, 冰湖水库各土层非盐化土面积占主导地位, 随土层深度增加, 非盐化土面积逐渐增大; 而柳城子水库各土层盐土面积占主导地位, 随土层深度增加, 盐土面积也逐渐增大。

关键词 内陆河流域; 地统计学; GIS; 水库; 空间变异

Spatial variability of soil salinity and “salt island” effect around oasis reservoir in arid area. CHAI Chen-hao^{1,2,3}, WANG Yu-gang^{1,2*}, ZHOU Hong-fei^{1,2}, ZHU Wei^{1,2,3}, LIU Li-juan^{1,2} (¹State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; ²Fukang Station of Desert of Ecology, Chinese Academy of Sciences, Fukang 831505, Xinjiang, China; ³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China).

Abstract: Oasis reservoir, a node of hydraulic system in the inland river watershed, plays an important role in transporting water in the process of regional agriculture development. We examined the effect of reservoir on soil salt accumulation with the Binghu Reservoir and Liuchengzi Reservoir in the Sangong River watershed as cases. The spatial variability of soil salinity around reservoir under two landscape types was studied by classical statistics, geostatistics and GIS. The results showed that: (1) Salt contents of soil profiles were higher in the natural landscape type around Liuchengzi Reservoir (0–20 cm: 20.77 g·kg⁻¹; 20–40 cm: 14.96 g·kg⁻¹; 40–60 cm: 16.9 g·kg⁻¹) than that of Binghu Reservoir (0–20 cm: 7.81 g·kg⁻¹; 20–40 cm: 5.66 g·kg⁻¹; 40–60 cm: 5.24 g·kg⁻¹) dominated by the irrigation landscape. Soil salt content showed a great variability (CV>100%) in each soil layer around the Binghu Reservoir and was moderately variable (10%<CV<100%) around the Liuchengzi Reservoir. (2) Soil salt content had a moderate spatial autocorrelation (0.25<C₀/(C₀+C)<0.75) around both reservoirs. Spatial

国土资源部公益行业科研专项(201511047-2)、国家自然科学基金项目(41371200, 41501205)和西部之光项目(2015-XBQN-A-06)资助。

收稿日期: 2017-11-22 接受日期: 2018-05-08

* 通讯作者 E-mail: wangyg@ms.xjb.ac.cn

dependence of soil salt content was mainly due to random factors resulted from the strong anthropogenic activities around Binghu Reservoir. The influence of structural factors gradually increased with soil depth. In contrast, the spatial variability of soil salinity was mainly induced by structural factors around Liuchengzi Reservoir. (3) There was "salt island" phenomenon around the agricultural reservoirs. Non-saline soil was a major type around the Binghu Reservoir, with the area of which increased with soil depth. However, saline soil was a dominant type around the Liuchengzi Reservoir, whose area increased with soil depth.

Key words: inland river basin; geostatistics; GIS; reservoir; spatial variability.

在我国西北干旱区,为促进区域经济的快速发展,自20世纪50年代起,新疆各地区修建了大量平原型水库和小型水库,为工、农业生产用水及居民生活用水提供了保障(谢晓勇等,2014)。由于早期水利工程建设水平较低,水库及输水系统渗漏严重致使下游地下水位抬升,在干旱区强烈的蒸发作用下,下层土壤可溶性盐类随毛管水向上层运移,造成水库周边表层土壤盐分聚积,盐渍化土地面积不断扩大,对水库周边的农业和生态环境造成了严重的危害。土壤盐渍化已经成为制约该区农业发展的主要因素之一,盐渍土的改良和合理利用对实现区域农业可持续发展和生态环境质量的改善意义重大,而对土壤盐分空间变异特征和分布规律的正确认识是合理利用和科学管理盐渍土的前提条件(毛沂新,2012;张雪等,2016)。

土壤盐渍化是由自然和人为因素共同作用产生的,具有很强的不确定性和高度的空间变异性(唐成等,2013;李龙等,2016)。土壤盐分的空间变异性作为土壤的一种重要自然属性,对其深入研究,不仅能够充分了解土壤耕作层内土壤盐渍化的程度和状态,同时也能更加全面地认识土壤盐分的空间分布特征(刘广明等,2012)。地统计学已被证明是研究土壤盐分空间分布特征及其变异规律的主要方法之一(Tripathi *et al.*, 2015)。近年来,国内外学者从不同尺度上对土壤盐分空间变异做了深入的研究,在研究方法上,在小面积定位监测以传统采样法为主,在大尺度调查研究方面,遥感与电磁感应技术相结合的方法被广泛应用(Li *et al.*, 2013; Ding *et al.*, 2014; 吴亚坤等,2015)。在研究对象上,研究区主要集中于农田地块、绿洲灌区、三角洲和干旱区内陆河流域整体景观(王玉刚等,2009;史玉娟等,2014;颜安等,2014;Wang *et al.*, 2018)等。目前对干旱区平原绿洲水库土壤盐分空间变异的研究较少,毛海涛等(2016)研究了干旱区水库下游土壤盐渍化,提出下游土壤的次生盐渍化的防治,需要选择合理的排

渗体与防渗体型式联合控渗,控制坝基渗漏量,将下游的地下水位调控到临界水位以下;李荣荣等(2016)对三工河流域的柳城子水库下游表层土壤盐分的研究认为,水库下游土壤盐渍化程度总体趋势加剧,并随着水库蓄水量的增加土壤盐渍化的程度也随之加大。以往的研究多数局限于表层土壤,未考虑土壤层次间盐分的空间变异特征,并且对于不同景观背景下水库的土壤盐分空间变异研究较少。

研究土壤盐分的空间变异特征是正确认识土壤盐渍化的发生发展规律和合理开发利用盐渍土资源的基础,同时可为盐渍土的改良和防治提供科学依据(Wang *et al.*, 2018)。因此,本研究以新疆三工河流域的典型水库——冰湖水库和柳城子水库为例,运用地学统计和地理信息系统的相关研究方法,探讨处于不同景观背景下水库的土壤盐分空间变异及其分布特征,为水库地区盐渍土的防治与开发利用提供理论基础和参考依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于新疆阜康市三工河流域(87°45′E—88°20′E, 43°20′N—45°30′N),地处天山北麓中段的博格达峰北侧,准噶尔盆地南缘的山前冲积平原。研究区地势总体南高北低,地貌分布大致为南部高山,中部平原,北部沙漠,该流域发源于天山博格达峰西北侧,流域内年均温为6.7℃,多年平均降水量约为163mm,多年平均潜在水面蒸发量大约为900mm,无霜期较短,夏季炎热干燥,冬季寒冷漫长,属于典型的干旱区大陆性气候(雒琼等,2017)。冰湖水库是建设兵团222团的主要水源地,为碾压式均质土坝,设计库容为 $1.9 \times 10^8 \text{ m}^3$,坝顶长5.72km,最大坝高11.8m,在阜康市中心以北4km处,是阜康市三工河末端的一座平原拦河式中型水库,周围有大量的农田,水库主要用于农业灌溉,灌溉面积达8

万亩。柳城子水库也属于碾压式均质土坝,设计库容为 $6 \times 10^7 \text{ m}^3$,坝顶长 4.45 km,最大坝高 4.9 m,位于阜康市 222 团西南 4 km 处,是水磨河下游的一座小型水库,在汛期用于洪水调蓄,水库周围以荒地为主,植被主要有梭梭、琵琶柴、柺柳及短命草本植物,地表盐斑随处可见,地势高低起伏,干湿洼地广布,水库水含盐量较高,库区周围以及干渠、支渠周围盐渍化严重。两座水库建于 20 世纪 60 年代,由于早期的防渗措施没有做好,在使用过程中都出现过严重的渗漏情况,水库坝口及下游盐渍土广泛分布。

1.2 样品采集与处理

为了更加准确地反映两个水库的实际情况,采样初期对两水库的土地利用方式、土壤质地、植被覆盖、地形等要素进行了勘察,并结合相关采样要求选择最佳采样位置,在三工河流域内对两个不同作用的水库单元进行了土壤样品的采集与分析。以水库为中心,沿 8 个方向(0° 、 45° 、 90° 、 135° 、 180° 、 225° 、 270° 、 315°)按照 0、100、200、300、400、600、800、1000 m 进行土壤样品采集,每个方向在水平上有 8 个采样点,共 64 个样点,垂直方向上取 0~20、20~40、40~60 cm,每个水库总样点数为 192,采样总数为 384 个。同时对每个采样点的海拔进行测定,收集水库每年的输入量、输出量、灌溉方式,并对水库周围的自然环境进行描述。采样时间是在土壤盐分相对稳定的 9 月底,采用 GPS 定位技术对采样点进行定位。

将采集土样放在室内风干,经过研磨筛选,选取 2 mm 的土样密封保存,每个样品均选取 10 g 土样加入 50 mL 去离子水,按 1:5 的土水质量比制备土壤溶液,根据《土壤农业化学分析方法》(鲁如坤, 2000) 中土壤可溶性盐测定方法,进行土壤盐分的测定。

1.3 数据处理与分析

本文使用 SPSS 21.0 对数据进行经典统计,主

要用于数据的前期处理,计算描述性统计值以及进行正态分布检验;采用地统计软件 GS+ 7.0 进行半方差函数模型的拟合运算;用 ArcGIS 10.2 进行各层盐分含量的 Kriging 插值以及绘制空间分布图。

2 结果与分析

2.1 不同景观背景下两座水库土壤盐分的统计特征

从表 1 可以看出,两个水库 0~60 cm 各层土壤盐分含量的特征值具有明显不同,各层盐分含量均有较大的变幅,数值差异较大。从盐分含量的变幅来看,冰湖水库各层土壤盐分含量的极差值,分别为 42.8、33.3、36.47 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。而柳城子水库的各层土壤盐分含量的极差值,分别为 88.59、56.61、66.01 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。从盐分含量的平均值来看,冰湖水库各层盐分含量变化范围为 7.57~10.1 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,柳城子水库各层盐分含量变化范围为 22.62~27.36 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,总体上两个水库的土壤含盐量均值都大于 6 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,柳城子水库土壤盐分含量明显高于冰湖水库。根据新疆土壤盐碱化的分级标准(新疆维吾尔自治区农业厅,1996):土壤盐分含量 $< 3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的为非盐化土, $3 \sim 6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为轻度盐化土, $6 \sim 10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为中度盐化土, $10 \sim 20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为盐化土, $> 20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为盐土。对各层盐分含量数据进行单样本正态分布检验(K-S 检验),结果表明,柳城子水库各层盐分数据符合正态分布,而冰湖水库各层盐分数据均不符合正态分布,需要进行数据转换,本文采取对数转换,之后的运算都使用转换后的数据。

由图 1 可知,冰湖水库土壤盐分含量的正态拟合线向右偏离,柳城子水库的拟合线近似正态分布。冰湖水库各土层盐分含量集中在 3 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下,库区大部分地区属于非盐化土,表明长期的农业灌溉使得土壤盐碱化程度减弱。从冰湖水库库周土壤剖面上看,表层土壤的盐分聚积性较强,盐分随深度逐

表 1 各层土壤盐分含量统计特征值

Table 1 Statistical characteristics of soil salt content in different layers

水库	深度 (cm)	极小值 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	极大值 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	平均值 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	标准差	极差	K-S 检验	变异系数 (%)
冰湖	0~20	0.73	43.53	7.81	10.1	42.8	0.00	129
	20~40	0.64	33.94	5.66	7.81	33.3	0.00	138
	40~60	0.58	37.05	5.24	7.57	36.47	0.00	144
柳城子	0~20	1.28	88.59	26.35	20.77	87.31	0.24	79
	20~40	1.33	56.61	22.62	14.96	55.28	0.39	66
	40~60	2.31	66.01	27.36	16.9	63.7	0.59	62

$n=64$ 。

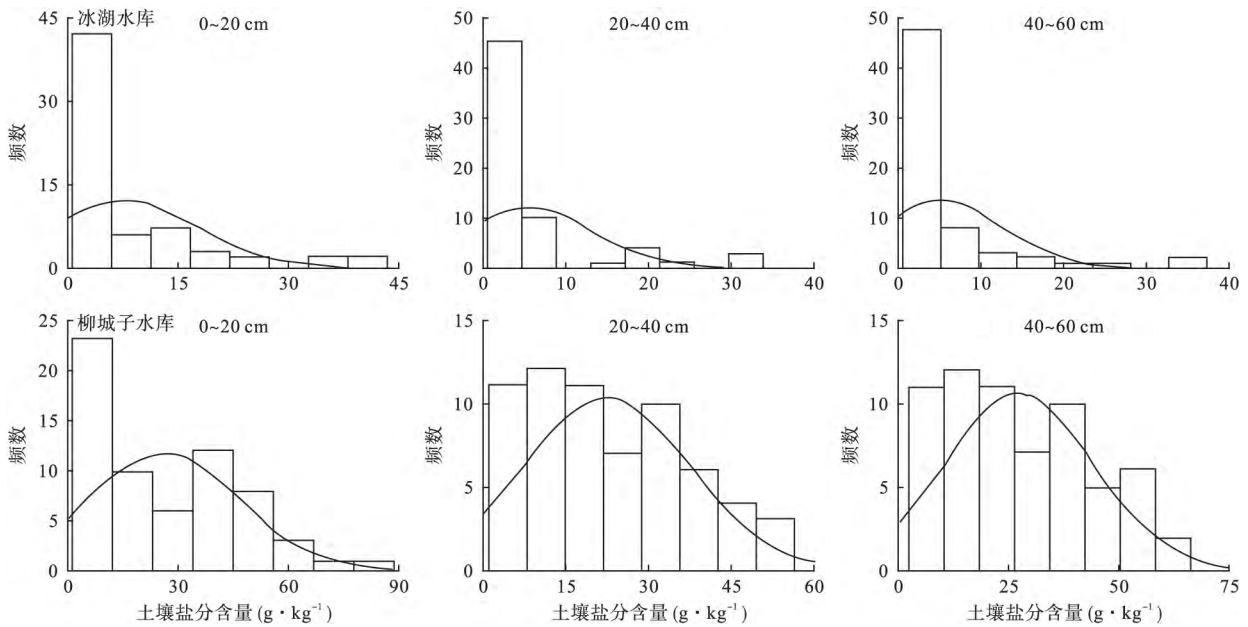


图 1 土壤盐分含量频数直方图
Fig.1 Frequency histogram of soil salt contents

渐降低,表层盐分含量最大,下部较低。柳城子水库各层土壤盐分主要集中在 1.28~60 g·kg⁻¹,非盐化土、轻度、中度、重度盐化土和盐土均有分布,各层土壤在不同程度上,均存在盐渍化现象,随深度增加土壤盐分含量逐渐增大,表明该区土壤盐分一直处于不断积聚的特征。

变异系数反映了数据的离散程度,可以衡量土壤盐分含量变异的强弱,当变异系数 $CV \leq 10\%$ 时为弱变异性, $10\% < CV \leq 100\%$ 时为中等变异性, $CV \geq 100\%$ 时为强变异性 (Zhao *et al.*, 2017)。冰湖水库各层土壤盐分含量的变异系数分别为 129%、138%、144%,各层均属于强变异性,并且随深度增加,变异性增大。柳城子水库各层土壤盐分含量的变异系数分别为 79%、66%、62%,各层属于中等强度变异性,并且随土层深度增加,变异性减小。柳城子水库各层土壤盐分含量的变异性比冰湖水库小,引起这种差异可能在于两个水库库周的土地利用方式不同,

柳城子水库周围土壤始终处于自然状态,主要受自然要素影响,而冰湖水库库周主要为农田,人为活动影响较大。

2.2 不同景观背景下土壤盐分空间变异特征

由表 2 可知,冰湖水库 0~20、40~60 cm 土壤含盐量与柳城子水库 0~20 cm 的土壤含盐量的理论模型符合指数模型,而冰湖水库 20~40 cm 的土壤含盐量与柳城子 20~40、40~60 cm 的土壤含盐量的理论模型符合球状模型。土壤盐分的空间变异主要有两部分构成,一是随机因素 C_0 (灌溉、施肥、耕作制度、土地利用方式等人为因素),另一方面是结构因素 C (主要有地质条件、地形、气候、植被、土壤类型等因素)。 $C/(C_0+C)$ 表示空间相关度,当 $C/(C_0+C) < 25\%$ 时,空间相关性较弱;当 $25\% < C/(C_0+C) < 75\%$ 时,属于中等空间相关性;当 $C/(C_0+C) > 75\%$ 时,空间相关性强 (Cambardella *et al.*, 1994)。由表 2 可知,总体上,两个水库 0~20、20~40 和 40~60 cm

表 2 各层土壤盐分含量半变异函数模型及参数值

Table 2 Semi-variogram models and parameter values of soil salinity in different layers

水库	深度 (cm)	模型	块金值 C_0	基台值 C_0+C	$C/(C_0+C)$	变程 (m)	决定系数 R^2	残差 RSS
冰湖	0~20	指数	0.1186	0.317	0.626	2349	0.740	0.014
	20~40	球状	0.0831	0.2722	0.695	2287	0.805	0.014
	40~60	指数	0.0888	0.3276	0.729	5337	0.784	0.012
柳城子	0~20	指数	0.024	0.0698	0.656	2391	0.869	0.0003
	20~40	球状	0.0247	0.0819	0.698	933	0.867	0.0005
	40~60	球状	0.0364	0.0756	0.519	510	0.294	0.001

的土壤盐分含量的块金值与基台值之比介于 25%~75% ,均属于中等空间自相关性,说明这两个水库土壤的盐分的空间变异是由结构性因素和随机因素两者共同作用的。从垂直上来看,冰湖水库土壤盐分含量的块金值与基台值之比随土壤深度增加逐渐变小,表明随深度增加随机性因素对土壤盐分的空间变异作用减弱,结构性因素的影响不断加强。柳城子水库的块金值与基台值之比在 40~60 cm 时最大,20~40 cm 时最小,0~20 cm 介于两者之间,说明在自然环境中结构因素对土壤盐分的空间变异起主导作用,40~60 cm 土壤盐分含量的块金值与基台值之比相对其他两层较大可能是由于水库渗漏引起的地下水位抬升以及微地形引起的深层土壤空间变异。

变程是区域变量之间空间自相关的最大距离,代表了研究区的空间自相关范围的大小(图 2)。两水库各层土壤盐分含量的变程各有其特点,冰湖水库除了 40~60 cm 变程很大之外,0~20 和 20~40 cm 变程相差很小,整体上随着土层深度的增加变程增大,说明冰湖水库各层土壤盐分的空间自相关距离随深度增加逐渐变大,空间相关性增强以及空间分布均匀连续。而柳城子水库各层土壤盐分含量的变程从表层向下层逐渐变小,表明空间自相关距离随深度增加逐渐减小,空间相关性减小以及空间连

续性差且分布不均匀,与冰湖水库的情况相反。

2.3 土壤盐分的空间分布特征

由表 3 可知,冰湖水库在 0~20 cm 层的土壤类型为非盐化土、轻度盐化土、中度盐化土、重度盐化土和盐土,面积分别为 7.99、4.73、4.88、2.62、0.53 km²,所占比例分别为 38.52%、22.79%、23.50%、12.65%、2.54%。其中非盐化土在该区所占比例最大,主要分布在水库的外围,在水库东北、东南、西南、西北方位成块状分布。冰湖水库盐分空间分布由内向外,呈环状分布,即中心盐分含量最大,向外逐渐减小,具有明显的“盐岛”特征(图 3)。冰湖水库中心为盐分最高的区域,向外依次是重度盐化土、中度盐化土、轻度盐化土和非盐化土。轻、中度盐化土主要分布在水库的北部、东部和南部,重度盐化土主要分布在水库附近。在 20~40 cm 层的土壤类型为非盐化土、轻度盐化土、中度盐化土和重度盐化土,面积分别为 9.91、6.57、2.62、1.64 km²,所占比例分别为 47.78%、31.65%、12.65%、7.92%。在该层,主要以非盐化土和轻度盐化土为主,分布面积达 79%。中度和重度盐化土主要分布在水库附近及南部,相对 0~20 cm 土层面积明显减小。在 40~60 cm 土层,土壤盐化特征与 20~40 cm 相似,非盐化土和轻度盐化土面积超过区域总面积的 80%以上,相比上层土壤,其面积向外围扩展。而中度和重度

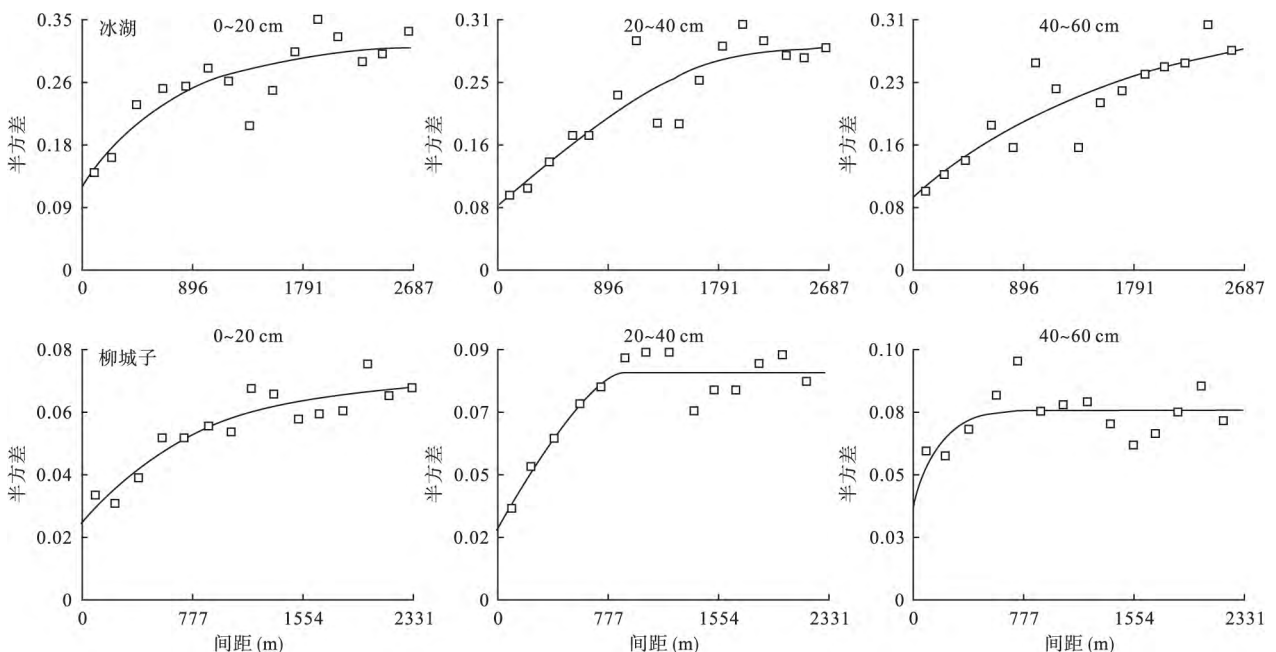


图 2 土壤盐分半方差散点图
Fig.2 Semi-variogram scatter plot of soil salt content in different layers

表3 各层土壤盐分的等级面积统计表

Table 3 Areas of different grades of soil salinity in different layers

水库	深度 (cm)	0~3 g·kg ⁻¹		3~6 g·kg ⁻¹		6~10 g·kg ⁻¹		10~20 g·kg ⁻¹		>20 g·kg ⁻¹	
		面积 (km ²)	比例 (%)	面积 (km ²)	比例 (%)	面积 (km ²)	比例 (%)	面积 (km ²)	比例 (%)	面积 (km ²)	比例 (%)
冰湖	0~20	7.99	38.52	4.73	22.79	4.88	23.50	2.26	12.65	0.53	2.54
	20~40	9.91	47.78	6.57	31.65	2.62	12.65	1.64	7.92	0.00	0.00
	40~60	10.22	49.26	7.04	33.92	2.31	11.12	1.18	5.7	0.00	0.00
柳城子	0~20	0.00	0.00	0.00	0.00	1.13	6.34	4.92	27.54	11.83	66.12
	20~40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.45	2.54	7.8	43.61	9.63	53.85
	10~60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.11	11.78	15.87	88.22

盐化的分布面积,具有向内缩小的趋势。总体来看,冰湖水库各土层非盐化土和轻度盐化土的面积不断增大,中度、重度盐化土和盐土逐渐减小。随着土层深度的增加,20~40 cm 土层非盐化和轻度盐化土的面积,比0~20 cm 土层分别增加了9.26%和8.86%,而40~60 cm 土层面积则比20~40 cm 土层增加了1.53%和0.46%。

柳城子水库在0~20、20~40和40~60 cm 层的土壤类型主要为中度盐化土、重度盐化土和盐土,其中盐土是其主要土壤盐渍化特征,研究区范围没有

轻度盐化土和非盐化土的分布(图3)。中度盐化土在各层的面积分别为1.13、0.45、0 km²,所占比例分别为6.34%、2.54%、0;重度盐化土在各层面积分别为4.92、7.8、2.11 km²,所占比例分别为27.54%、43.61%、11.78%;盐土在各层的面积分别为11.83、9.63、15.87 km²。所占比例分别为66.12%、53.85%、88.22%。在剖面上,0~20 cm 土层的中度盐化土以块状分布在水库的东北部,重度盐化土有两个分布区,第一个分布区在水库北部呈“P”型连续分布,另一个以块状分布镶嵌在南部盐土分布区,盐土的分

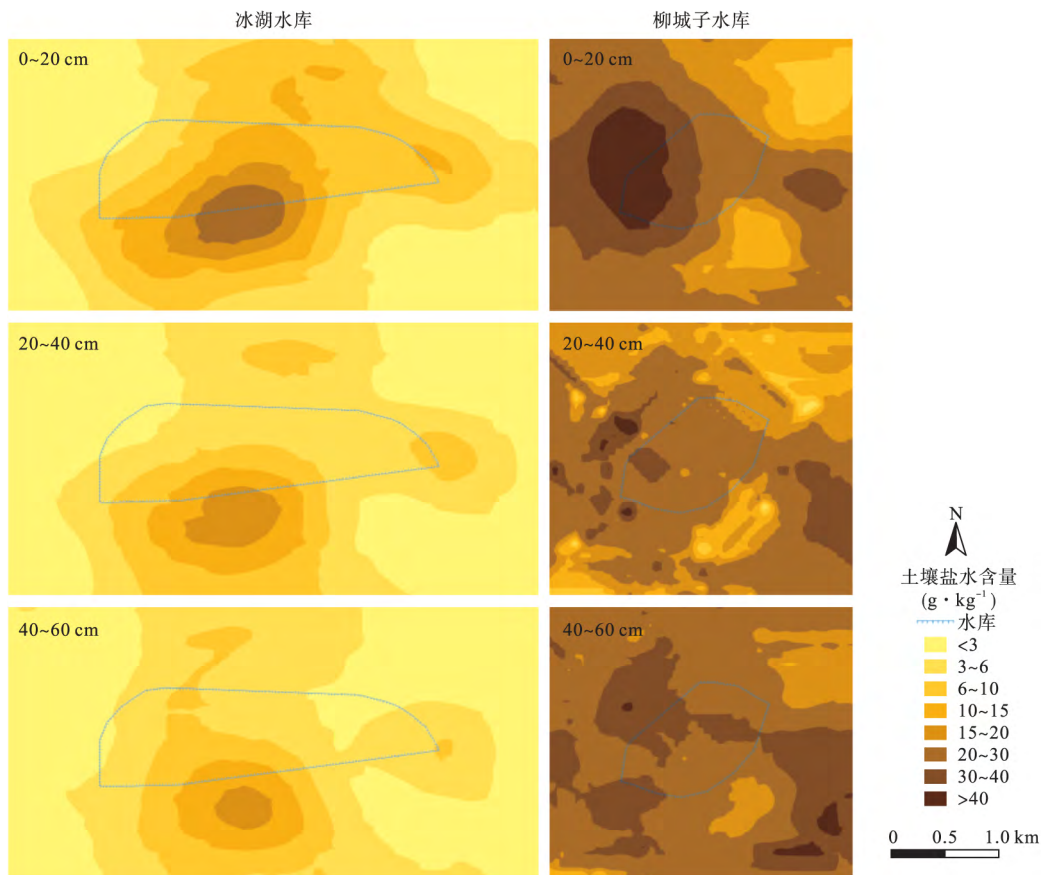


图3 各层土壤盐分含量的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of soil salt content in soil profile

布呈现出以水库为中心并向外分布特征,也显示出以水库为中心的“盐岛”特征。在20~40 cm土层,中度盐化土和盐土分布与0~20 cm相似,其分布面积减小,而重度盐化面积增加。在40~60 cm土层,主要以盐土分布面积为主,其分布比例高达88.22%,相比0~20和20~40 cm土层,分别高出了22.1%和34.37%。在该土层,没有中度盐化土分布。对于柳城子水库库周盐分,整体上看,各层重度盐化土的面积减小,盐土的面积不断增大,表层0~20 cm呈现“盐岛”效应,其他层次这种特征不显著(图3)。

3 讨论

不同景观背景下两座水库的土壤盐分含量和空间分布差异明显,冰湖水库各土层以非盐化土分布为主,盐渍化程度低。而柳城子水库各层以盐土分布为主,盐渍化程度很高,且土壤盐分含量远大于冰湖水库,是因为处于自然景观背景下的柳城子水库周围植被覆盖度低,地表裸露面积大,雨季降水量小且时间短,盐分大都集中在包气带40~100 cm土层中,成为盐分存储区,强烈的蒸发引起下层土壤中可溶性盐类随毛细水向上运动,导致大量盐分在表层积聚(郭文聪等,2011)。同时柳城子水库地势起伏大,在地势低洼的区域,盐随水来,水去盐留,使土壤表层盐分的积聚性强于其他区域,地势低洼的区域易发生盐分表聚(高婷婷等,2010)。而农业灌溉景观一定程度上对土壤中的盐分具有淋洗作用,并且由农田灌溉所引起的积盐过程小于洗盐过程(王玉刚等,2008),而且平整土地和深翻松耕,可以减少地形的影响,促进土壤熟化,从而使其表层土壤盐分含量减少。

半方差变异函数理论模型可以从结构性、随机性和相关性等多方面分析土壤特性的空间变异特征,并将土壤某一性质的变异与成土过程和成土因子联系起来,加深对土壤特性的理解(张瑞等,2014;宗路平等,2015)。对两个水库各层土壤盐分含量进行半方差函数理论模型的最优拟合,而对于理论半方差函数模型,步长的取值至关重要(李晓明等,2012)。本文以步长数乘以步长大小等于采样点最大距离的1/2为原则,以半方差函数模型的残差最小和决定系数最大为拟合标准来选择步长的大小(表2,图2)。以水库为中心的区域土壤盐分具有明显的空间异质性特征,冰湖水库土壤盐分含量具有较强的变异性,土壤盐分在空间上的分布差

异很大。这主要是因为冰湖水库自建库以来,周边地区的土地利用方式发生了改变,由自然景观转变为农业灌溉景观,人类活动和农业生产(灌溉、耕作方式等)改变了土壤水的入渗率,土壤水是土壤盐分运移和变化的主要驱动力,农业灌溉加快了土壤溶液中盐粒子之间的交换(Wang *et al.*, 2018),再加上农业灌溉时间和用水量的差异造成盐分淋洗时间不一致和淋洗水量分布不均匀,灌溉水将土壤中的盐分进行再分配,使得土壤盐分在空间上分布不均匀,从而导致其变异系数很大(管孝艳等,2012),同时频繁的人类活动(灌溉、施肥、耕作方式等)加强了耕作层土壤之间的关联性(Liu *et al.*, 2016),使冰湖水库土壤盐分的空间自相关增强。因此冰湖水库土壤盐分空间变异性主要是由随机性因素主导。而处于自然状态下的柳城子水库库周地势起伏较大,土壤盐分的变异性主要受微地形、气候、地下水位等结构性因素的影响(Wang *et al.*, 2013),土壤盐分的空间分布相对均匀,所以空间变异性较小。水库周边地区受人为活动扰动少,土壤保持原有的状态,土壤之间的关联性差,故土壤盐分的自相关性较小。

从土壤盐分空间分布上来看,土壤盐分在水库库周呈环状分布,呈现出以水库为中心的土壤盐分的“盐岛效应”。但不同景观背景的水库,这种效应不同。以农业灌溉景观为主的冰湖水库周围土壤,体现出更明显的“盐岛”特征,并且水库对上、下游方向区域土壤盐分的影响,也高于其他方向。而以自然景观为背景的柳城子水库库周土壤盐分,“盐岛”效应是在0~20 cm土层明显,而在下层土壤更多的体现出微地形的效应。由冰湖水库和柳城子水库库周盐分“盐岛”效应的特征差异表明,水库周围土地利用方式的改变,显著地改变了盐分的空间分布格局,使其趋向于以水库为中心的“盐岛”效应的形成。

4 结论

基于不同景观背景下的水库库周土壤盐渍化程度有显著差异。冰湖水库各土层以非盐化土分布为主,柳城子水库各土层则以盐土分布为主,柳城子水库(自然景观)各层土壤盐分含量明显高于冰湖水库(灌溉景观)。冰湖水库各层土壤盐分含量的变异系数均大于100%,属于强变异,柳城子水库各层土壤盐分的变异系数在60%~80%,属于中等变异。

土壤盐分的空间变异特征分析的结果显示,冰

湖水库和柳城子水库各层土壤盐分含量均属于中等强度的空间相关性。冰湖水库土壤盐分的空间变异性是由随机性和结构性因素共同作用引起的,柳城子水库土壤盐分的空间变异性由结构性因素主导。

水库影响着周边土壤盐分空间分布,具有明显的“盐岛”效应。两座水库各层土壤盐分空间分布的趋势大体一致,水库上、下游较其他方向更容易受到盐渍化的威胁,并且各层土壤盐分含量以水库为中心的向外逐渐减小。因此,防治盐渍化首先需要做好水库及干支渠的防渗工作,还要对库区地下水位加强监测,将其控制在临界深度以下。

参考文献

- 高婷婷,丁建丽,哈学萍,等. 2010. 基于流域尺度的土壤盐分空间变异特征——以渭干河-库车河流域三角洲绿洲为例. *生态学报*, **30**(10): 2695-2705.
- 管孝艳,王少丽,高占义,等. 2012. 盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系. *生态学报*, **32**(4): 198-206.
- 郭文聪,樊贵盛. 2011. 原生盐碱荒地的盐分积累与运移特性. *农业工程学报*, **27**(3): 84-88.
- 李龙,姚云峰,秦富仓,等. 2016. 半干旱区县域尺度土壤有机碳的空间变异特征. *生态学杂志*, **35**(8): 2003-2008.
- 李荣荣,熊黑钢,段鹏程,等. 2016. 干旱区平原水库下游盐渍化土壤光谱时空分布特征分析. *土壤学报*, **47**(3): 532-536.
- 李晓明,杨劲松,余美,等. 2012. 典型干旱区土壤盐分空间异质性的步长大小优化选择. *灌溉排水学报*, **31**(3): 93-95.
- 刘广明,吕真真,杨劲松,等. 2012. 典型绿洲区土壤盐分的空间变异特征. *农业工程学报*, **28**(16): 100-107.
- 鲁如坤. 2000. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社.
- 雒琼,王玉刚,邓彩云,等. 2017. 干旱区土壤剖面无机碳分布及其与盐碱性的关系. *水土保持学报*, **31**(5): 240-246.
- 毛海涛,樊哲超,何华祥,等. 2016. 干旱、半干旱区平原水库对坝后盐渍化的影响. *干旱区研究*, **33**(1): 74-79.
- 毛沂新,王力华,张丹,等. 2012. 三角洲平原水库堤坝土壤水和可溶性盐空间分布特征. *生态学杂志*, **31**(7): 1780-1784.
- 史文娟,马媛,徐飞,等. 2014. 不同微尺度膜下滴灌棉田土壤水盐空间变异特性. *水科学进展*, **25**(4): 585-593.
- 唐成,杜虎,宋同清,等. 2013. 喀斯特峰丛坡地不同土地利用方式下土壤N、P空间变异特征. *生态学杂志*, **32**(7): 1683-1689.
- 王玉刚,肖笃宁,李彦,等. 2008. 三工河流域中上游绿洲土壤盐化的时空动态. *中国沙漠*, **28**(3): 478-484.
- 王玉刚,郑新军,李彦,等. 2009. 干旱区不同景观单元土壤盐分的变化特征. *生态学杂志*, **28**(11): 2293-2298.
- 吴亚坤,刘广明,杨劲松,等. 2015. 基于多源数据的中原黄泛区土壤盐分空间变异分析. *农业工程学报*, **31**(5): 115-120.
- 谢晓勇,侍克斌. 2014. 干旱区平原水库渗流及下游土壤盐渍化分析. *西北水资源与水工程学报*, **25**(2): 180-183.
- 新疆维吾尔自治区农业厅,新疆维吾尔自治区土壤普查办公室. 1996. 新疆土壤. 北京: 科学出版社.
- 颜安,蒋平安,盛建东,等. 2014. 玛纳斯河流域表层土壤盐分空间变异特征研究. *土壤学报*, **51**(2): 410-414.
- 张瑞,戴伟,庞欢,等. 2014. 北京市北运河流域耕地土壤性质空间变异性. *生态学杂志*, **33**(12): 3368-3373.
- 张雪,陈耀轩,张盼,等. 2016. 孔雀河流域农业灌区土壤盐分空间分布及变异特征. *土壤*, **48**(6): 1223-1228.
- 宗路平,角媛梅,李石华,等. 2015. 哈尼梯田景观水源区土壤水分时空变异性. *生态学杂志*, **34**(6): 1650-1659.
- Cambardella CA, Moorman TB, Parkin TB, et al. 1994. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, **58**: 1501-1511.
- Ding J, Yu D. 2014. Monitoring and evaluating spatial variability of soil salinity in dry and wet seasons in the Werigan-Kuqa Oasis, China, using remote sensing and electromagnetic induction instruments. *Geoderma*, **235-236**: 316-322.
- Li HY, Shi Z, Webster R, et al. 2013. Mapping the three-dimensional variation of soil salinity in a rice-paddy soil. *Geoderma*, **195-196**: 31-41.
- Liu G, Li J, Zhang X, et al. 2016. GIS-mapping spatial distribution of soil salinity for eco-restoring the Yellow River Delta in combination with electromagnetic induction. *Ecological Engineering*, **94**: 306-314.
- Tripathi R, Nayak AK, Shahid M, et al. 2015. Characterizing spatial variability of soil properties in salt affected coastal India using geostatistics and kriging. *Arabian Journal of Geosciences*, **8**: 10693-10703.
- Wang Y, Deng C, Liu Y, et al. 2018. Identifying change in spatial accumulation of soil salinity in an inland river watershed, China. *Science of the Total Environment*, **621**: 177-185.
- Wang Y, Li Y. 2013. Land exploitation resulting in soil salinization in a desert-oasis ecotone. *Catena*, **100**: 50-56.
- Zhao WJ, Sheng J, Li ZL, et al. 2017. Spatial variability of soil salinity in a gravel-sand mulched jujube orchard at different scales. *Journal of Irrigation & Drainage Engineering*, **143**: 04017009-8.

作者简介 柴晨好,男,1993年生,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail: chaichenhao16@mails.ucas.ac.cn
责任编辑 魏中青