DOI: 10. 16030/j. cnki. issn. 1000-3665. 201906021

荒漠一湿地生态系统区盐渍土特征及空间变异性

魏玉涛^{1,2},刘德玉^{1,2},张 伟^{1,2},喻生波^{1,2},吴耀坤^{1,2} (1. 甘肃省地质环境监测院,甘肃 兰州 730050; 2. 甘肃省地下水工程及地热资源重点实验室,甘肃 兰州 730050)

摘要: 敦煌西湖国家级自然保护区地处西北极端干旱区,具有特殊的荒漠-湿地生态系统。土壤盐渍化问题突出且研究 程度很低,保护区内的哈拉齐一带甚至为研究空白区。在对保护区进行详细调查以及采样测试的基础上,采用传统统计 学与地统计学相结合的方法对0~120 cm 深度内的土壤盐分特征及空间变异性进行了研究,填补了该区域的研究空白。 研究结果表明:保护区内的土壤含盐量总体呈现随深度增加而降低的趋势,具有明显的表聚性特征;土壤盐渍化类型为 中盐土和重盐土,化学类型为硫酸盐一氯化物型以及氯化物一硫酸盐型;土壤含盐量总体表现为中等变异性;受结构性 因素主导,土壤含盐量总体呈现出中-强空间相关性;表层土壤含盐量具有明显的空间分布变化规律,总体呈现出西南 低,东北高的特征。影响保护区表层土壤含盐量空间变化的自然因素包括极端干旱气候、地下水位埋深、与河流距离、地 势条件以及土壤质地类型。研究结果可为该类型区域的土壤盐渍化防治及生态环境保护提供科学依据和参考。 关键词:盐渍土;含盐量;空间变异性;生态环境;敦煌西湖自然保护区;地统计学 中图分类号: P642.11⁺5 文献标识码:A 文章编号: 1000-3665(2020) 02-0183-08

Characteristics and spatial variability of saline soil in desert-wet ecosystem area, Gansu Province, China

WEI Yutao^{1,2}, LIU Deyu^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, YU Shengbo^{1,2}, WU Yaokun^{1,2}

(1. Gansu Institute of Geological Environment Monitoring, Lanzhou, Gansu 730050, China; 2. Key Laboratory of Groundwater Engineering and Geothermal Resources in Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: The Dunhuang Xihu National Nature Reserve is located in the extreme arid area of Northwest China, with a special desert-wetland ecosystem. The problem of soil salinization in this area is prominent and the related researches are very rare. The Harazi section of the reserve has not yet been examined. Based on detailed investigation and sampling and detecting of the reserve, the characteristics and spatial variability of soil salinity at the depth of 0 to 120 cm are studied by the combination of traditional statistics and geostatistics, which fills the research gap in this area. The result shows that the soil salt content decreases with the increasing depth, and it is obviously characterized by surface aggregation. The types of soil salinization are medium saline soil and heavy salt soil. The chemical types are sulfate chloride and chloride sulfate types. The soil salt content is generally of moderate variability. Dominated by structural factors, the soil salt content shows a spatial correlation of moderate to strong intensity. The salt content of the surface soil has obvious spatial distribution and variation pattern, and it generally shows the characteristics of low in the southwest and high in the northeast. The natural factors affecting the spatial variation in soil salinity in the study area include the extreme arid climate, groundwater table depth, distance far from rivers, topographic conditions and soil texture types. The results can provide a scientific basis and reference for soil salinization control and ecological

收稿日期: 2019-06-10; 修订日期: 2019-08-15

基金项目: 甘肃省监测站点运行维护与水质样品采集项目(WT2018115B)

第一作者:魏玉涛(1975-),男,高级工程师,主要从事水文地质环境地质方面的研究工作。E-mail: wytaolz@163. com

environmental protection in this type of area.

Keywords: saline soil; salt content; spatial variability; ecological environment; Xihu Nature Reserve, Dunhuang; geostatistics

土壤盐渍化是干旱半干旱地区常见的一种生态环 境问题^[1-2],盐渍化程度与土壤中的盐分含量、分布及 运移特征密切相关。土壤盐分具有高度的时空变异性 和复杂性^[3],国内学者们针对不同区域尺度、不同土 地类型的土壤盐分空间变异性开展了深入研究。赵宣 等^[4] 对毛乌素沙漠与黄土高原过渡带的土壤盐渍化 空间异质性及影响因素进行了探讨,明确了该区域土 壤全盐含量具有强烈的空间自相关性,影响因素以地 形及水文地质条件为主;李会亚等^[5]对民勤绿洲灌区 表层土壤盐分的空间变异性进行了研究,经分析发现 民勤绿洲的土壤全盐及主要离子均表现出强烈的空间 相关性,空间分布均呈现出西南和北部中心偏低、中部 偏东和东北部偏高的斑块状分布格局;刘普幸、张克新 等[6-8]分析了敦煌西湖保护区胡杨林下的土壤水盐空 间变化特征,揭示了研究区内的土壤全盐量具有明显 的表聚作用且变异明显,属于中强度变异。以上学者 均通过传统的土钻法分层取样,然后室内测试土壤全 盐量,最后采用经典统计学与地统计学相结合的方法 研究土壤全盐的空间变异特征和分布规律。姚远 等^{19]}采用新颖的电磁感应技术测定土壤盐分,利用地 统计学方法分析了塔里木盆地北缘绿洲区的土壤盐分 空间变异性,并分析得出研究区内的土壤含盐量属于 强空间相关性。传统的采样、测试方法易受人力、物 力、时间等因素的限制且所获取的数据量偏少,而电磁 感应技术具有非接触直读式,测量速度快、数据获取量 大的优点,适用于大面积的土壤盐渍化监测、调查和评 估工作。

敦煌西湖国家级自然保护区地处甘肃省河西走廊 的最西端,主要保护对象为湿地生态系统、荒漠生态系 统以及野生动植物,是典型的生态环境脆弱区。保护 区内的湿地和植被有效阻挡了库姆塔格沙漠东扩,是 保卫敦煌绿洲的强有力生态屏障,其重要性不言而喻。 然而,近年来,受西北气候暖干化^[10]以及上游建坝截 流的影响,保护区内地下水位持续下降,湿地面积萎 缩,植被退化,土地荒漠化、盐渍化程度加剧^[11-12]。目 前国内对该地区的盐渍化土问题研究程度很低,尤其 是与西部库姆塔格沙漠接壤的哈拉奇一带,因地处荒 漠戈壁无人区,交通不便,自然环境条件恶劣,为研究 空白区。本文通过采用野外调查、采样测试、传统统计 学与地统计分析相结合的方式研究了保护区内(包括 哈拉奇)0~120 cm 深度区间的土壤盐分特征及空间 变异性,揭示了表层土壤盐分的空间分布规律及主要 影响因素,填补了该区域的研究空白,旨在为该区域及 相似地区的土壤盐渍化防治及生态环境保护提供科学 依据和参考。

1 研究区概况

敦煌西湖国家级自然保护区位于甘肃省敦煌市 西部,距敦煌市约 120 km。保护区西邻库姆塔格沙 漠和罗布泊,南接阿克赛哈萨克族自治县,北连新疆 维吾尔族自治区(图 1)。保护区总面积 66 × 10^4 hm²,湿地面积9.8×10⁴ hm²,保护区四周均被沙 漠、戈壁所隔绝,地势总体南高北低,最高海拔 2 359 m,最低海拔 820 m。保护区气候极端干旱,属 于典型的大陆性气候,年平均气温 9.9℃,最高气温 40℃,最低气温 – 30℃。年均降水量 39.9 mm,蒸 发量 2 486 mm。保护区内的天然植被有柽柳、胡杨、 骆驼刺、芦苇、红砂、梭梭等。

保护区内的主要河流为党河及疏勒河。党河是疏 勒河的主要支流,发源于甘肃北部祁连山团结峰,靠冰 雪融水补给,于甘肃北部党城湾出祁连山。受地质构 造影响,双塔—三危山中间隆起,水流受阻转向。河流 出山后,沿隆起带向西径流,在沙枣园附近向东北折转 进入敦煌盆地,最终汇入疏勒河,河流全长 390 km,流 域面积 14 325 km²。自 1958 年疏勒河上游修建双塔 水库用于截流灌溉之后,流入保护区内的水量急剧减 少并最终断流,目前河道已干涸。在夏季洪水期间,保 护区南部出现多条源自阿尔金山和祁连山的季节性河 流,自西向东分别为外留图泉、八龙沟、小多坝沟、多坝 沟以及崔木土沟等河流。

西湖自然保护区地处敦煌盆地冲湖积平原潜水一承压水带,地下水补给来源主要为阿尔金山东段的冰 雪融水及降水,其次为党河水系的地表水下渗形成的 地下水,少部分来源于南部沟谷季节性河流入渗补给。 含水层为中、上更新统粉细砂夹粗砂,与亚砂土、亚黏 土构成多层结构,水位埋深小于10m,含水层厚度0~ 30m。单井涌水量小于1000m³/d,TDS超过3g/L。 在后坑一哈拉诺尔一线地下水溢出形成大量小面积的 塘湖。在地下水位浅埋区,地下水主要靠强烈的蒸发 及植物蒸腾垂直排泄。





2 研究方法

2.1 土壤样品采集及测定

基于野外调查,本次研究于2016年7-8月在西 湖自然保护区内选取了6个典型采样点,分别为哈拉 齐、清水梁、湾腰、大马迷兔、小马迷兔以及后坑(图 1)。在每个采样点内分别布设13个小采样点,每个 小采样点按照垂向深度 0~10 cm、10~30 cm、30~ 60 cm、60~90 cm、90~120 cm 分别采集土样,同时采 用 GPS 定位技术记录各采样点的坐标位置。本次研 究共取得土样 390 个。在实验室内将采集的土壤样品 经过自然风干、磨碎、过2 mm 筛后备用。按照5:1的 水土比用蒸馏水浸提土样,分析测定土壤的 K^+ 、Na⁺、 Ca²⁺、Mg²⁺、CO²⁻、HCO⁻3、SO²⁻、Cl⁻含量。其中,K⁺、 Na⁺采用火焰光度法测定; Ca²⁺、Mg²⁺采用 EDTA 络合 滴定法测定; CO3²⁻、HCO³⁻采用双指示剂滴定法测定; SO²⁻ 采用 EDTA 间接滴定法测定; Cl⁻采用 AgNO₃ 滴 定法测定。以上阴、阳离子含量之和即为土壤含盐量, 测试方法及精度符合《土壤农业化学分析方法》。

2.2 数据处理

(1) 采用 SPSS 19.0 软件对数据进行描述性统计 分析并采用 K-S 法做正态分布检验;

(2) 采用 GS + 9.0 计算并选择最优半方差函数理

论模型和参数;

(3) 采用上一步拟合的最优模型及参数在 ArcGIS 10.0 地统计模块中用 Kriging 方法进行数据的内插计算,并绘制表层 0~10 cm 深度的土壤盐分空间分布图。

3 结果与分析

3.1 土壤含盐量垂直变化特征分析

从采样点土壤平均含盐量随深度的变化(图2)可 以看出,含盐量总体呈现随深度增加而降低的趋势。 表层 0~10 cm 的平均含盐量为 188.29~348.33 g/ kg,远大于其它深度的含盐量,差异性显著,盐分分布 具有明显的表聚性特征。其中,后坑的平均含盐量最 大,其次为清水梁、湾腰、小马迷兔、哈拉齐、大马迷兔。 $10 \sim 30 \text{ cm}$ 十层的平均含盐量较 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 快速下降, 该层段变幅最大。其中,后坑的降幅最大,为 311.96 g/kg,大马迷兔的降幅最小,为125.70 g/kg。 在 30 cm 以下的土层平均含盐量变幅呈现逐渐下降的 趋势,30~60 cm 的变幅为 8.55~29.22 g/kg,60~ 90 cm 的变幅为 2.53~8.58 g/kg,90~120 cm 的变幅 为 3.01 ~ 7.38 g/kg,其中,哈拉齐在 90~120 cm 的平 均含盐量较 60~90 cm 略微升高,升幅 1.76 g/kg。总 体上,深度60 cm 以下土壤的平均含盐量变幅较小,随 深度增加缓慢下降。





3.2 盐渍化土类型划分

参考疏勒河中下游地区盐碱化土类型划分方法及标准^[13],将研究区 0~120 cm 深度的土壤平均含盐量按照表 1 划分为中盐土和重盐土,其中后坑土壤平均含盐量为 84 g/kg,属于重盐土;大马迷兔、小马迷兔、 湾腰、后坑、哈拉齐以及清水梁均为中盐土,土壤平均含盐量分别为 65 g/kg、61 g/kg、69 g/kg、53 g/kg、 71 g/kg。

根据中国土壤学会盐渍土专业委员会对土壤化学 类型的划分方法及标准^[14-15],Cl⁻/SO₄²⁻ \leq 0.2为硫酸 盐型;0.2 \leq Cl⁻/SO₄²⁻ \leq 1 为氯化物一硫酸盐型;1 \leq Cl⁻/SO₄²⁻ \leq 2 为硫酸盐一氯化物型;Cl⁻/SO₄²⁻ >2 为 氯化物型。经计算得出,哈拉齐与后坑的土壤化学类 型为硫酸盐—氯化物型,Cl⁻和 SO₄²⁻ 浓度之比分别为 1.41,1.04;大马迷兔、小马迷兔、湾腰以及清水梁的土 壤化学类型均为氯化物一硫酸盐型, Cl⁻和 SO₄²⁻ 浓度 之比分别为 0. 66, 0. 73, 0. 48, 0. 93。

表1 盐渍化土分类标准

ruble i Clubbilleution blundur a for the buildized bo	Fable 1	Classification	standard	for the	salinized	soi
---	---------	----------------	----------	---------	-----------	-----

类型	非盐渍化土	盐渍化土	轻盐土	中盐土	重盐土	特重盐土
 土壤平均含盐量 (g•kg ⁻¹)	<4	4~20	20 ~40	40 ~ 80	80 ~ 160	>160

3.3 土壤盐分的统计特征分析

由于土壤含盐量在不同深度上表现出了一定的变 异特征,可用样本变异系数 Cv 反映该特征。变异系 数是描述变量特征的重要参数,反映了变量的离散程 度^{16]}。对变异系数的计算一般要求数据满足正态分 布,否则可能存在比例效应^[17]。对于不符合要求的数 据做对数变换,使其满足正态分布后再计算 C_v值。 经 K-S 法检验,0~120 cm 土层含盐量数据均呈对数 正态分布。当样本的变异系数 C_v > 100%, 说明其为 强变异性; $10\% \leq C_v \leq 100\%$, 说明其为中等变异性; $C_{\rm v} < 10\%$,说明其为弱变异性^[18-21]。经计算得出(表 2),研究区 0~120 cm 深度的土层含盐量均表现为中 等变异性。总体上,随深度增加,0~60 cm 土层含盐 量的变异系数呈现降低趋势,说明变异性逐渐减弱;60 ~120 cm 土层含盐量的变异系数呈现小幅上升趋势, 说明变异性逐渐增强;0~30 cm 土层含盐量的变异系 数较大,为中强度变异,反映出表层土壤含盐量变异性 较强,受气候、地形、地表植被类型、盖度、土壤质地等 多种因素干扰。

表 2 不同深度下的土壤含盐量统计特征值

土层深度/cm	最大值/(g•kg ⁻¹)	最小值/(g•kg ⁻¹)	平均值/(g•kg ⁻¹)	标准差	分布类型	K-S检验系数	变异系数 $C_V / \%$
0 ~ 10	868.38	2.75	252.76	215.99	LgN	0.15	73.81
10 ~ 30	111.14	0. 55	34. 22	26.58	LgN	0.39	60.35
30~60	71.27	0.50	19.68	16.69	LgN	0.07	40.65
60 ~90	53.62	1.02	14.56	12.88	LgN	0.32	43.46
90 ~ 120	56.38	0.85	11.54	13.91	LgN	0.98	56.80

 Table 2
 Statistical characteristics of the soil salt content at different depths

3.4 土壤盐分特征的空间变异性分析

对土壤盐分的传统统计分析只能在一定程度上反 映样本全体,不能定量地刻画土壤盐分的随机性和结 构性、独立性和相关性^[22]。在此需要引入地统计学中 的半方差函数分析和探索土壤盐分的空间变异性。一 般选择决定系数 R^2 最高,残差 RSS 最低的拟合模型 为最优半方差函数理论模型。在半方差函数中,块金 值 C_0 代表变量的随机性变异,C 代表变量的结构性变 异,基台值 C_0 + C 代表系统总的变异,块金值与基台 值的比值 $C_0 / (C_0 + C)$ 代表变量的空间自相关性,反 映系统的空间异质性^[23-26]。若 $C_0 / (C_0 + C) < 25\%$, 说明变量具有强烈的空间相关性; $C_0 / (C_0 + C)$ 在 25% ~ 75% 之间,说明具有中等空间相关性; $C_0 / (C_0 + C)$ 在 ($C_0 + C$) >75%,说明空间相关性很弱。变程 A 是衡 量空间变异程度的另一个重要参数,代表变量的空间 相关范围。在变程之内,变量具有空间自相关性,反之 则是独立的^[16]。

通过计算得出(表3),0~30 cm 土层含盐量的最

优半方差函数理论模型为指数模型,30~90 cm 为球状模型,90~120 cm 为高斯模型。0~10 cm 土层含盐量的 $C_0/(C_0 + C)$ 值为 38.77%,具有中等空间相关性,说明随机性和结构性因素共同控制变量的空间变异性,但是由结构性因素引起的空间变异性程度相对较高,占 61.23%;10~120 cm 土层含盐量的 $C_0/(C_0 + C)$ 值均小于13%,表现出强烈的空间相关性,说明变量的空间变异性主要由地形、土壤质地、地下水位埋深、溶解性总固体等结构性因素控制。

表 3 不同深度下的土壤含盐量半方差函数模型及参数 Table 3 Semi-variance function model and parameters of the soil salt conten at different depths

					-		
土层深 度/cm	理论模型	C_0	$C_0 + C$	$C_0 / (C_0 + C) / \%$	A/km	R^2	RSS
0 ~ 10	指数模型	0.157	0.405	38.77	29.63	0.818	0.005
$10\sim 30$	指数模型	0.019	0.226	8.22	3.15	0.655	0.002
$30\sim\!60$	球状模型	0.021	0.204	10.13	1.35	0.614	0.016
$60\sim 90$	球状模型	0.007	0.200	3.70	1.38	0.752	0.009
90 ~ 120	高斯模型	0.026	0.213	12.28	3.69	0.571	0.002

各土层含盐量的变程值 A 在 1.35~29.63 km,其 中 10~120 cm 土层含盐量的变程差异较小,说明其空 间自相关范围具有很大相似性; 0~10 cm 土层含盐量 的变程最大,说明表层土壤含盐量具有更大的空间自 相关性。

3.5 表层土壤盐分的空间分布特征

在 0~10 cm 深度内, 土壤盐分呈现出明显的表聚 性特征, 且变异性较强。为直观描述表层土壤盐分在 空间上的分布状况, 在 ArcGIS10.0 地统计模块中采用 最优无偏估计 Kriging 内插法并结合上一步拟合的最 优半方差函数理论模型及参数绘制表层土壤盐分空间 分布图(图 3)。

从图中可看出,表层土壤含盐量具有明显的空间 分布变化规律,总体呈现出西南低,东北高的特征。低 值区位于哈拉齐南部一带的区域,高值区位于后坑中 心一带区域。自西向东方向上,土壤含盐量空间变化 特征可划分为三段,第一段沿着哈拉齐到清水梁、湾腰 一带,土壤含盐量逐渐升高;第二段从清水梁、湾腰到 大马迷兔及小马迷兔一带,土壤含盐量逐渐降低;第三 段沿着大、小马迷兔到后坑一带,土壤含盐量又呈现逐 渐升高的趋势。



图 3 表层土壤盐分空间分布图 Fig. 3 Spatial distribution of the surface soil salinity

4 讨论

研究发现,研究区的土壤盐分具有明显的表聚作 用,在30~60 cm以下的土壤平均含盐量具有随深度 增加而缓慢减小的特征,而且表层土壤含盐量呈现出 西南低,东北高的空间分布规律。张克新、刘普幸^[8] 于2007年5月及2009年9月分别在敦煌西湖保护区 胡杨林内选择后坑、大马迷兔、疏勒河河床、湾腰、火烧 湖作为采样点,按照0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、 60~80 cm、80~100 cm、100~120 cm 深度分别采集土 样,进行土壤盐分测试分析:土壤全盐含量变化表浅层 较高,从40~60 cm 以下全盐含量的变化随深度增加 逐渐减少;土壤全盐含量存在明显的空间差异性,表现 出西南低、东北高的空间分布规律。以上结论与本次 研究结果一致。

研究区的表层含盐量在后坑、哈拉齐、湾腰、清水 梁、大马迷兔、小马迷兔等不同地段具有显著差异性, 而进一步分析探讨造成该差异的影响因素,对于认识 研究区盐渍土的形成过程以及指导盐渍土的防治工作 都具有重要的意义。刘普幸通过研究得出^[6]:影响研 究区土壤盐分空间变化的自然因素主要有极端干旱的 气候条件以及地下水位埋深,但本次研究认为还应补 充距离河流远近、地势高低以及土壤质地类型3个影 响因素,以上因素相互关联,综合作用于研究区的土壤 盐分及植被生长分布格局。

后坑位于保护区最东侧,距北侧的疏勒河古河道 较近,地下水可接受疏勒河地下潜流补给。后坑中心 一带地势低洼,汇水条件好,表层土壤质地主要为亚黏 土,渗透性能较差,地下水径流滞缓,排泄不畅,地下水 位埋藏浅,埋深小于1m。在气候干燥、蒸发量大、地 下水埋藏较浅的地区,地下水中的盐分随着土壤水分 的蒸发不断向地表迁移聚集^[27-28],导致表层土壤含盐 量升高,呈现出表聚性特征。在野外调查中发现,后坑 中心一带分布有沼泽湿地,喜湿的芦苇植物生长茂盛。 裸露地块的表层多见白色盐壳,盐壳下部土壤较为潮 湿。这说明后坑中心一带具有地下水位埋深浅,表层 含盐量高的特点。

哈拉齐位于保护区最西侧,紧邻库姆塔格沙漠,表 层土壤含盐量自北向南,自东向西呈现逐渐降低的趋势。这主要是由于地下水位埋深的不同以及土壤质地 类型的差异导致的。随着距离北侧疏勒古河道越远, 从北到南,地下水位埋深由1~2 m逐渐加深到5~ 8 m,表层土壤含盐量越来越低。在野外调查中发现, 自北向南,植被显著减少,地表裸露面积大;离西侧库 姆塔格沙漠越近,表层土壤质地类型由亚黏土逐渐过 渡为细砂,颗粒粒径逐渐由细变粗,毛细作用减弱,毛 细水上升高度降低,携带盐分的能力减弱,表层土壤含 盐量降低。有研究显示^[29],亚黏土的毛细水上升高度 为 300~350 cm,细砂的毛细水上升高度为 35~ 120 cm。在野外调查中发现,在哈拉齐与沙漠接触地 带,呈现荒漠景观,地表植被覆盖度极低,零星可见红 砂、骆驼刺等耐旱植被。

湾腰位于保护区中南部,是区内海拔最低的地方, 低洼的地形有利于地下水的汇集,在夏季洪水期间可 接受来自南部山区的小多坝沟以及多坝沟的季节性河 流补给,地下水位埋深约1m,表层土壤含盐量较高; 清水梁距离疏勒河古河道较近,可接受疏勒河地下潜 流补给。地下水位埋深约1~1.3m,相对较浅,表层 土壤含盐量较高;大马迷兔及小马迷兔距疏勒河古河 道较远,接受地下水补给量有限,地下水位埋深约 1.5~2m,但小马迷兔在洪水期间可以接受来自南部 山区多坝沟以及崔木土沟的季节性河流补给,水位埋 深较大马迷兔稍浅,表层土壤含盐量相对较高。

后坑、哈拉齐、湾腰、清水梁、大马迷兔、小马迷兔 地处无人区,地表无排水沟,地下水主要靠强烈的蒸发 及植物蒸腾垂直排泄。

5 结论

(1)研究区内的土壤含盐量总体呈现随深度增加 而降低的趋势,具有明显的表聚性特征;土壤盐渍化类 型为重盐土一中盐土,土壤化学类型为硫酸盐一氯化 物型以及氯化物一硫酸盐型。

(2)0~120 cm 深度内的土壤含盐量具有中等变 异性;受地形、土壤质地、地下水位埋深、矿化度等结构 性因素主导,土壤含盐量总体呈现出中一强空间相 关性。

(3) 表层土壤含盐量具有明显的空间分布变化规 律,总体呈现出西南低,东北高的特征。低值区位于哈 拉齐南部一带的区域,高值区位于后坑中心一带区域。 自西向东方向上,土壤含盐量表现出升高到降低再到 升高的趋势。

(4)研究区表层土壤含盐量除受极端干旱的气候 条件影响外,还与区域地下水位埋深以及土壤质地类 型密切相关,其中地下水位埋深还受到距离河流远近 以及地势高低的影响。

参考文献(References):

- [1] 丁建兩,姚远,王飞. 干旱区土壤盐渍化特征空间 建模[J]. 生态学报, 2014, 34(16): 4620-4631.
 [DING J L, YAO Y, WANG F. Detecting soil salinization in arid regions using spectral feature space derived from remote sensing data [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(16): 4620-4631.(in Chinese)]
- [2] 陈伟志,李安洪,李楚根,等.无砟轨道粗颗粒盐 渍土路基设计方法[J].水文地质工程地质, 2017,44(6):58-63.[CHEN W Z,LI A H,LI C G, et al. Design methods of coarse grained saline soil subgrade in ballastless track [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017,44(6):58-63.(in Chinese)]
- [3] 赵锐锋,陈亚宁,洪传勋,等. 塔里木河源流区绿 洲土壤含盐量空间变异和格局分析-岳普湖绿洲为 例[J]. 地理研究, 2008,27(1):7-9. [ZHAO R F, CHEN Y N, HONG C X, et al. Study on spatial variability and pattern of soil salinity of the oasis in the headstreams of the Tarim River Basin: A case study on Yuepuhu oasis [J]. Geographical Research, 2008, 27(1):7-9.(in Chinese)]
- [4] 赵宣,郝起礼,孙婴婴.典型毛乌素沙漠-黄土高 原过渡带土壤盐渍化空间异质性及其影响因素
 [J].应用生态学报,2017,28(6):1761-1768.

[ZHAO X, HAO Q L, SUN Y Y. Spatial heterogeneity of soil salinization and its influencing factors in the typical region of the Mu Us Desert-Loess Plateau transitional zone, Northwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(6): 1761 – 1768. (in Chinese)]

- [5] 李会亚,冯起,陈丽娟,等. 民勤绿洲灌区表层土 壤盐分空间变异性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2017,31(4):136-141. [LIHY,FENGQ,CHEN LJ, et al. Spatial distribution characteristics of topsoil salinity in the Minqin oasis, Northwest China [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017,31(4):136-141.(in Chinese)]
- [6] 刘普幸,张克新,霍华丽,等. 疏勒河中下游绿洲 胡杨林土壤水盐的空间变化特征与成因[J]. 自然 资源学报, 2012, 27(6): 942 - 952. [LIU P X, ZHANG K X, HUO H L, et al. Characteristics and causes of the spatial variations of soil water and salt content under populus euphratica Oliv. in the middle and lower reaches of the Shule River Basin [J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(6): 942 -952.(in Chinese)]
- [7] 刘普幸,姚晓军,张克新,等.疏勒河中下游胡杨林土壤水盐空间变化与影响[J].水科学进展,2011,22(3):359-366.[LIU P X, YAO X J, ZHANG K X, et al. Spatial variation and effects of soil moisture and salt content of populus euphratica Oliv in the middle and lower reaches of the Shule River [J]. Advances in Water Science, 2011, 22 (3):359-366.(in Chinese)]
- [8] 张克新,刘普幸,霍华丽,等. 敦煌绿洲天然胡杨林下土壤水盐空间变化特征研究[J]. 土壤通报,2012,43(3):563-570. [ZHANG K X, LIU P X, HUO H L, et al. The spatial variations of soil water and saline content under populus euphratica in Dunhuang oasis [J]. Chinese Journal of Soil Science,2012,43(3):563-570.(in Chinese)]
- [9] 姚远,丁建丽,张芳,等. 基于电磁感应技术的塔 里木盆地北缘绿洲土壤盐分空间变异特性[J].中 国沙漠, 2014, 34(3): 765 – 772. [YAO Y, DING J L, ZHANG F, et al. Monitoring the spatial variability of soil salinity and composite in dry and wet seasons in north tarim basin monitored with electromagnetic induction instruments [J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(3): 765 – 772. (in Chinese)]
- [10] 姚玉璧,肖国举,王润元,等.近50年来西北半干 旱区气候变化特征[J].干旱区地理,2009,32

(2): 159 – 165. [YAO Y B, XIAO G J, WANG R Y, et al. Climatic changes of semi-arid region over the northwest China in recent 50a [J]. Arid Land Geography, 2009, 32 (2): 159 – 165. (in Chinese)]

- [11] 袁海峰,庞晓燕,李永华. 甘肃敦煌西湖国家级自然保护区作用及现存问题的分析[J]. 湿地科学与管理,2009,5(1):21-23. [YUAN H F, PANG X Y, LI Y H. Analysis of functions and existing problems of the West Lake National Nature Reserve in Dunhuang, Gansu [J]. Wetland Science & Management, 2009, 5(1):21-23. (in Chinese)]
- [12] 杨俊仓,施锦,陈伟涛.敦煌西湖湿地演化趋势及保护对策[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2014,50(5):716-721.[YANG J C, SHI J, CHEN W T. Evolution trend of and protection measures for Dunhuang west lake wetland [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences),2014,50(5):716-721.(in Chinese)]
- [13] 程旭学,陈崇希,闫成云,等.河西走廊疏勒河流 域地下水资源合理开发利用调查评价[M].北京: 地质出版社,2008.[CHENG X X, CHEN C X, YAN C Y, et al. Investigation and assessment of groundwater resources rational exploitation and utilization in Shule River Basin of Hexi Corridor [M]. Beijing: Geology Press, 2008.(in Chinese)]
- [14] 王丹丹. 新疆渭干河绿洲土壤盐分时空变化特征
 [D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2013. [WANG D
 D. Spatial and temporal variation characteristics of soil salinity in Weigan oasis of Xinjiang [D].
 Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2013. (in Chinese)]
- [15] 中国土壤学会盐渍土专业委员会.中国盐渍土.分类分级文集 [M].南京:江苏科学技术出版社, 1989: 3-35. [Salinized soil Committee of China Soil Association. Saline soil in China. Classified and graded Anthology [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1989: 3-35. (in Chinese)]
- [16] 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[J].应用生态学 报,2015,26(3):769-776.[SHEN H,J L L• ABUDUWAILI. Spatial distribution of soil moisture and salinity and their influence factors in the farmland of Manas River catchment, Northwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(3): 769-776.(in Chinese)]
- [17] 赵明亮,李艳红,朱海强.艾比湖流域不同生态系

统土壤水盐空间异质性分析 [J]. 土壤通报, 2016, 47(6): 1306 – 1313. [ZHAO M L, LI Y H, ZHU H Q. Analysis of the spatial variability of soil moisture and salinity under different ecosystems in Ebinur Lake Basin [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(6): 1306 – 1313. (in Chinese)]

- [18] 王丹丹, 于志同, 程猛, 等. 渭干河绿洲不同土地 利用类型土壤盐分的变化特征分析 [J]. 干旱区地 理, 2018, 41(2): 349 – 357. [WANG D D, YU Z T, CHENG M, et al. Characteristics of soil salinity under different land use types in Weigan River Oasis [J]. Arid Land Geography, 2018, 41(2): 349 – 357.(in Chinese)]
- [19] 马成霞,丁建丽,杨爱霞,等. 绿洲区域土壤盐渍 化主要参数的空间异质性分析 [J]. 干旱区资源与 环境, 2015, 29(2): 144 – 150. [MA C X, DING J L, YANG A X, et al. Spatial variability of key parameters of soil salinization in oasis area [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(2): 144 – 150. (in Chinese)]
- [20] 曹立国,刘普幸,王洪岩,等. 民勤绿洲天然胡杨林生长季土壤水盐动态 [J]. 生态与农村环境学报,2012,28(1):47-53. [CAO L G, LIU P X, WANG H Y, et al. Dynamics of soil water and salt during the growing season of populus euphratica forest in Minqin oasis [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2012, 28(1):47-53.(in Chinese)]
- [21] 孙剑虹,张瑞庆,王欢元,等.陕西定边盐渍土土 壤含盐量和 pH 的空间分布特征 [J].西北农业学 报,2014,23(9):114-119. [SUN J H, ZHANG R Q, WANG H Y, et al. Spatial variation of soil salt content and pH of salinized soil in Dingbian County, Shaanxi Province [J]. Acta Agriculturae Boreali– occidentalis Sinica, 2014,23(9): 114-119. (in Chinese)]
- [22] 丁建丽,张飞,江红南,等.塔里木盆地北缘绿洲 土壤含盐量和电导率空间变异性研究——以渭干 河-库车河三角洲绿洲为例[J].干旱区地理, 2008,31(4):624-632.[DING J L, ZHANG F, JIANG H N, et al. Spatial variability of soil conductivity and salt content in the north Tarim Basin: A case study in the delta oasis of Weigan-Kuqa Rivers
 [J]. Arid Land Geography, 2008,31(4):624 -632.(in Chinese)]
- [23] 臧亮,张慧,赵红安,等. 黄骅市土壤含盐量空间 变异特征和影响因素分析[J]. 土壤通报,2017,48

(3): 545 – 551. [ZANG L, ZHANG H, ZHAO H A, et al. Assessment on spatial variability and influencing factors of soil salinity in Huanghua City [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(3): 545 – 551. (in Chinese)]

- [24] 赵玉,冯起,李会亚,等.黑河下游土壤盐分分布 特征[J].中国沙漠,2017,37(6):1196-1203.
 [ZHAO Y, FENG Q, LI H Y, et al. Distribution characteristics of soil salts in the lower reaches of Heihe River, Northwest China [J]. Journal of Desert Research, 2017, 37 (6): 1196 - 1203. (in Chinese)]
- [25] 宁岸新,翁骏超. 阿拉尔垦区中尺度土壤水盐空间 异质性分析 [J]. 湖北农业科学,2016,55(16):
 4120 - 4123. [NING A X, WENG J C. Spatial variation of soil water-salt on moderate scale in the Aler reclamation [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2016,55(16): 4120 - 4123.(in Chinese)]
- [26] 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 G M, LYU Z Z, YANG J S. Spatial variation characteristics of soil salinity in typical oasis region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(16): 100-107. (in Chinese)]
- [27] 武丹, 贾科利, 张晓东, 等. 基于异质 SVM 神经网络的土壤盐渍化灾害预测模型 [J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(5): 143 149. [WU D, JIA K L, ZHANG X D, et al. Soil salinization disaster prediction model based on heterogeneous SVM neural network [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(5): 143 149. (in Chinese)]
- [28] 田言亮,严明疆,张光辉,等.环渤海低平原土壤 盐分分布格局及其影响机制研究[J].水文地质工 程地质,2015,42(1):118-122.[TIAN Y L, YAN M J, ZHANG G H, et al. Soil salinity distribution and its impact mechanism around the Bohai Sea low plain [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015,42(1):118-122.(in Chinese)]
- [29] 张人权,梁杏,靳孟贵,等.水文地质学基础[M]. 北京:地质出版社,2011. [ZHANG R Q, LIANG X, JIN M G, et al. Hydrogeological Foundation [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011. (in Chinese)]

编辑: 张若琳