

方丽章, 李艳红, 李发东, 等. 艾比湖湿地土壤水分-盐分-养分空间异质性分析[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(1): 157-167.

FANG Li-zhang, LI Yan-hong, LI Fa-dong, et al. Analysis of spatial variation of soil moisture-salinity-nutrient in Ebinur Lake wetlands, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(1): 157-167.

## 艾比湖湿地土壤水分-盐分-养分空间异质性分析

方丽章<sup>1,2</sup>, 李艳红<sup>1,2\*</sup>, 李发东<sup>1,2,3,4</sup>, 朱海强<sup>1,2</sup>

(1.新疆师范大学地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054; 2.新疆维吾尔自治区重点实验室, 新疆干旱区湖泊环境与资源实验室, 乌鲁木齐 830054; 3.中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 4.中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100190)

**摘要:**为了解艾比湖湿地土壤水分-盐分-养分空间异质性,在环湖一周160 km范围内,以湖心质点为中心,将艾比湖湿地划分为东北、西北、西南、东南4个区域,于2014—2015年5、8月采样,对表层(0~20 cm)土壤含水量、盐分、养分、pH值空间异质性进行研究,结果表明:不同区域土壤盐分、养分、pH值8月高于5月,土壤含水量则相反,其中土壤含水量、盐分、养分属于中等变异,土壤pH值为弱变异;5、8月不同区域土壤盐渍化在中度盐化与盐土化水平之间,pH值呈碱性或强碱性,土壤养分等级较低,总体较为贫瘠。球状模型、指数模型、高斯模型能较好地描述艾比湖湿地土壤空间变异特征,决定系数变化范围为31%~96%;不同区域土壤含水量块金系数小于34%;除5月西南部土壤pH和东北部土壤养分外,不同区域土壤盐分、pH、养分块金系数均小于25%;土壤盐分、pH、养分的Moran's *I*(莫兰)系数波动均较大,表明空间相关性较强。从空间上看,5、8月土壤含水量呈带状分布,高值区出现在西北部与西南部,低值区主要在东南部与东北部;土壤盐分高值区主要在西北与东南部,低值区在西南部与东北部;土壤pH高值区主要在西北部及湖周围;土壤有机质、全氮高值区都出现在西北部、西南部,土壤全磷呈无规则斑点状分布,高、低值区较为分散。研究发现,影响艾比湖湿地空间异质性的因素中,土壤盐分、pH、养分主要受结构性因素影响,土壤含水量受结构性因素和随机性因素共同影响。

**关键词:**艾比湖湿地;水分-盐分-养分;半方差函数;空间异质性

**中图分类号:**X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2019)01-0157-11 **doi:**10.11654/jaes.2018-0632

### Analysis of spatial variation of soil moisture-salinity-nutrient in Ebinur Lake wetlands, China

FANG Li-zhang<sup>1,2</sup>, LI Yan-hong<sup>1,2\*</sup>, LI Fa-dong<sup>1,2,3,4</sup>, ZHU Hai-qiang<sup>1,2</sup>

(1.College of Geographic Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China; 2.Key Laboratory of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Xinjiang Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Area, Urumqi 830054, China; 3.Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 4.College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** To study the spatial variation of soil moisture-salinity-nutrient in Ebinur Lake wetlands, the wetlands were divided into 4 regions, northeast, northwest, southwest, and southeast, in a circular research area of 160 km<sup>2</sup>. The temporal and spatial distribution characteristics of soil salinity-nutrient-moisture and pH values in the surface layer(0~20 cm) were studied in May and August in 2014 and 2015. The results were as follows. The soil salinity, nutrients, and pH in different regions were higher in August than those in May, whereas the soil moisture content was the opposite. The soil moisture, salt, and nutrient contents were moderately variable, and the soil pH value was

收稿日期:2018-05-14 录用日期:2018-11-20

作者简介:方丽章(1991—),女,硕士研究生,主要从事干旱区资源开发与规划的研究。E-mail:lizhang526@126.com

\*通信作者:李艳红 E-mail:lyh0704@126.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41561104)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41561104)

weakly variable. The soil salinization conditions in different regions in May and August were between moderate salinization and saline level. The pH value was alkaline or strongly alkaline, and the soil nutrients were generally poor. The spatial variability of the soil in Ebinur Lake wetlands could be well-described by the spherical, exponential, or Gauss model, and the coefficient of variation ranged from 31% to 96%. The nugget coefficients of soil water content were less than 34% in different regions. In addition to the soil pH in the southwestern region in May, and the soil nutrients in the northeast region, the nugget coefficients of soil salinity, pH, and nutrient in different regions were all less than 25% in May and August. The Moran's  $I$  coefficients of soil salinity, pH, and nutrient fluctuated greatly, indicating that the spatial correlation was strong. The soil moisture contents in May and August were distributed in strips. The high-value areas appeared in the northwest and southwest, and the low-value areas mainly in the southeast and northeast. The soil-salinity high-value areas were mainly in the northwest and southeast; the low-value areas were in the southwest and northeast. The soil-pH high-value areas were mainly in the northwest and around the lake. The distributions of the soil organic matter and total nitrogen had certain similarities, and the high-value areas appeared in the northwest and southwest. The total phosphorus content in the soil was irregular and spot-like, and the high and low values were scattered. It was found that the soil moisture content was influenced by both the structural and random factors, and the soil salinity, pH, and nutrients were mainly affected by the structural factors in the Ebinur Lake wetlands.

**Keywords:** Ebinur Lake wetlands; moisture-salinity-nutrients; semi-variogram; spatial change ability

土壤水分、盐分、养分是湿地循环系统内关键的组成部分<sup>[1-2]</sup>,土壤含水量是土壤重要状态参数<sup>[3]</sup>。土壤盐分空间分布能反映土壤盐渍化状态和程度<sup>[4]</sup>,土壤养分反映湿地生态系统土壤肥力,它们都受到土壤理化性质、水文过程等多种因素的影响<sup>[5-6]</sup>,因此掌握土壤水分、盐分、养分时间变化与空间格局有利于土壤资源的合理利用<sup>[7]</sup>。国外学者<sup>[8-9]</sup>认为土壤水盐及养分的空间变异有一定的规律,其中土壤盐分空间变异受结构性因素影响,土壤养分运用球状模型能很好地拟合,这种规律可为研究湿地生态系统的潜在变化过程提供条件。国内学者对于干旱区湿地土壤理化性质研究包括黑河湿地<sup>[10]</sup>、黄河源湖泊湿地<sup>[11]</sup>、敦煌西湖荒漠湿地<sup>[12]</sup>等,研究发现土壤因子时间变化与空间异质性与研究区植被、土壤质地、水文变化及人为干扰有关<sup>[13]</sup>。艾比湖湿地是干旱区荒漠生态系统的典型代表,受到高盐、大风、沙化和干旱的影响,土壤退化严重,对艾比湖湿地生态环境格局及其脆弱性研究十分有必要。目前关于艾比湖湿地的研究集中在博尔塔拉河(以下简称博河)、精河等河流下游,主要研究了土壤盐分对植物群落的影响<sup>[14]</sup>,河岸带土壤盐分离子变化特征<sup>[15]</sup>,不同植物群落下土壤盐分与养分的空间变化<sup>[16]</sup>,环湖湿地土壤水盐空间变异等<sup>[17]</sup>,而缺乏对艾比湖湿地土壤水分-盐分-养分三者的区域空间性系统研究。因此本文采用2014—2015年5、8月野外采样数据,以湖心质点为中心,从不同区域分析艾比湖湿地土壤含水量、盐分、pH、养分时间变化及空间异质性,以期为艾比湖国家级自然保护区土壤动态变化提供基础数据,为生态环境管理及土壤盐渍化治理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

艾比湖湿地国家级自然保护区(44°30'~45°09' N, 82°33'~83°53' E)位于新疆维吾尔自治区天山西段北麓,准噶尔盆地西南部,属于温带大陆性气候,干燥少雨多风,盐尘暴和浮尘活动繁多。年平均气温在6~8℃,极端最高气温41.7℃,最低-32.2℃,降水量在100 mm左右,潜在蒸发量约1300 mm。西北部处于阿拉山口大风通道上,年均风速6 m·s<sup>-1</sup>,大风日数为165 d,其中瞬间最大风速高达55 m·s<sup>-1</sup>。艾比湖是典型的尾间湖,1998—2013年间艾比湖面积缩小了18.59%<sup>[18]</sup>,土壤沙化盐化加剧,环湖一周土壤退化存在明显差异,以湖心质点<sup>[17]</sup>(44°52' 33.77" N, 83°2' 18.34" E)为中心将艾比湖湿地划分为4个区域(图1):东北部、东南部、西北部、西南部。西北部干涸湖底有大面积盐壳及含盐疏松的裸土,土壤类型主要是盐土,其中西北部科克巴斯陶附近有天然泉水外流;东北部奎屯河和东南部阿奇克苏河已经断流,两河下游地区土壤沙化严重,土壤类型分别是灰棕漠土和盐土,其中东南部风成地貌较明显;西南部博河与精河入湖口主要是湖滨湿地、冲-洪积平原,土壤类型主要是细砂、粉砂、黏土等,其中西南部精河下游2002年实施围堰和土壤改良工程。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 样品采集与测定

在2014年和2015年5、8月环湖一周160 km范围,根据湿地实际情况设置67个样点,采样时均为晴天,记录每一个样点的海拔高程、经/纬度及样地附近

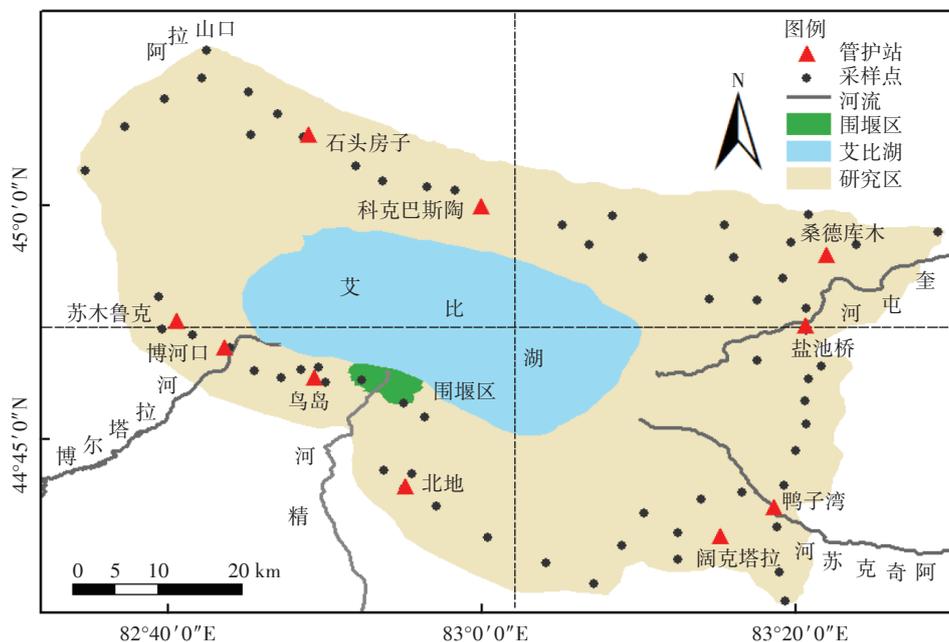


图1 研究区示意图

Figure 1 Research area schematic drawing

的植被类型和土壤质地等环境要素。除去土壤表层杂物,自下而上采集0~20 cm土壤,装入样品袋密封带回实验室,自然风干、磨碎、过筛。土壤全盐含量测定,制备1:5的土水质量比浸提液,土壤pH值用玻璃电极测定,土壤含水量用烘干法测定,土壤有机质采用重铬酸钾氧化法测定,土壤全磷用碱熔-钼锑抗比色法测定,土壤全氮用凯氏定氮仪测定<sup>[19]</sup>。

### 1.2.2 数据处理

使用Excel、SPSS对数据进行统计分析和差异显著性检验,运用GS+进行半方差函数计算和Moran's I系数分析,Kriging(克里金)插值以及空间分布图使用ArcGIS绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 艾比湖湿地土壤水分-盐分-养分季节变化特征

#### 2.1.1 土壤含水量变化特征

本研究对数据进行Kolmogorov-Smirnov法正态检验( $P < 0.05$ ),实验数据不符合正态分布,需要对数据进行对数转换,转换后均呈正态分布。土壤含水量受地下水埋深、气候等影响较大,为清楚了解土壤含水量的季节变化,由表1可知,不同区域土壤含水量5月大于8月。对5、8月不同区域土壤含水量差异性分析表明,东北部、东南部土壤含水量均变化显著( $P < 0.05$ ),西北部、西南部土壤含水量变化均不显著( $P >$

0.05),5、8月含水量最大值分别为255.73、230.28  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,最小值分别为6.82、2.61  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。按照变异系数(CV)划分等级<sup>[20]</sup>:  $\text{CV} < 10\%$ 为弱变异性;  $10\% < \text{CV} < 100\%$ 为中等变异性;  $\text{CV} > 100\%$ 为强变异性。土壤含水量变异系数5月小于8月,含水量变异系数在60%~100%之间,属中等变异性。

#### 2.1.2 土壤盐分与pH值变化特征

从表1中可以看出土壤盐分与pH值的季节变化。土壤盐分含量8月高于5月,对5、8月不同区域土壤盐分含量差异性分析表明,土壤盐分变化均表现为不显著( $P > 0.05$ ),最大值分别为37.25、47.61  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,最小值分别为1.48、2.17  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,按照变异系数划分等级,土壤盐分变异系数5月高于8月,变异系数均在20%~80%,属于中等变异。除东北部外,不同区域土壤pH值8月大于5月,西北部、东南部土壤pH值均变化显著( $P < 0.05$ ),按照变异系数划分等级,不同区域土壤pH值变异系数 $\text{CV} < 10\%$ ,均属于弱变异。参照新疆土壤盐碱化的分级标准<sup>[21]</sup>可知,5、8月4个区域土壤盐渍化有所差异,西北部土壤达到盐土化水平,东北部土壤达到中度盐化水平,西南部与东南部土壤达到重度盐化水平。土壤pH值整体呈现出碱性或强碱性。

#### 2.1.3 土壤养分变化特征

对不同区域土壤养分季节变化进行分析(表1),

表1 5、8月份土壤含水量、盐分与pH、养分的统计特征

Table 1 Statistical characteristic values of soil moisture, salinity, pH and nutrient in May and August

土壤因子 Soil factor	区域 Area	最大值 Max		最小值 Min		平均值 Mean		标准差 Standard deviation		变异系数 Coefficient of variation		分布类型 Distribution type	
		5月	8月	5月	8月	5月	8月	5月	8月	5月	8月	5月	8月
含水量/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	NE	136.33	93.81	6.82	2.61	68.38	37.21	44.72	28.70	0.65	0.77	N	N
	NW	255.73	230.28	44.31	28.86	101.89	77.86	64.10	57.52	0.63	0.74	LN	LN
	SW	142.33	132.59	19.44	5.09	71.90	60.28	44.34	44.60	0.62	0.74	LN	LN
	SE	119.82	81.11	19.85	4.74	54.79	28.16	34.39	26.80	0.63	0.95	LN	LN
盐分/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	NE	17.14	18.36	1.85	2.53	7.53	7.68	4.07	4.47	0.54	0.58	N	N
	NW	37.25	47.61	7.70	13.14	19.92	26.98	9.25	10.46	0.46	0.39	N	N
	SW	23.10	21.52	3.94	6.36	12.34	12.76	5.52	4.18	0.45	0.33	N	N
	SE	34.71	36.39	1.48	2.17	14.80	15.12	10.66	10.90	0.72	0.72	N	N
pH	NE	8.71	8.69	7.16	7.15	7.98	7.97	0.45	0.45	0.06	0.06	N	N
	NW	8.88	9.82	7.67	8.61	8.43	9.37	0.36	0.36	0.04	0.04	LN	LN
	SW	9.41	10.00	7.86	8.20	8.74	9.13	0.55	0.72	0.06	0.08	N	N
	SE	9.10	10.06	7.54	7.97	8.52	9.07	0.52	0.70	0.06	0.08	LN	N
有机质/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	NE	12.08	10.21	2.77	6.21	6.97	8.51	2.67	1.00	0.38	0.12	N	LN
	NW	19.81	24.62	2.24	4.89	9.19	12.21	5.16	5.74	0.56	0.47	LN	N
	SW	17.85	22.95	1.84	2.50	8.76	10.23	4.22	5.65	0.48	0.55	N	N
	SE	11.36	12.36	3.96	4.96	7.12	8.23	1.87	1.92	0.26	0.23	N	N
全磷/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	NE	0.96	1.25	0.64	0.84	0.86	1.14	0.09	0.11	0.10	0.10	N	N
	NW	1.54	1.97	0.63	0.84	0.87	1.25	0.27	0.34	0.30	0.27	LN	N
	SW	1.41	1.54	0.19	0.31	0.67	0.81	0.31	0.31	0.46	0.38	N	N
	SE	0.87	1.10	0.13	0.36	0.31	0.66	0.18	0.20	0.59	0.30	LN	N
全氮/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	NE	0.74	0.84	0.20	0.31	0.39	0.49	0.17	0.17	0.43	0.34	N	N
	NW	1.27	2.22	0.24	0.78	0.74	1.17	0.36	0.44	0.48	0.38	N	N
	SW	1.44	1.52	0.20	0.17	0.63	0.68	0.38	0.38	0.60	0.56	LN	N
	SE	0.69	0.94	0.25	0.25	0.44	0.54	0.13	0.21	0.29	0.39	N	N

注:N为正态分布;LN为对数正态分布;NE为东北部,NW为西北部,SW为西南部,SE为东南部。下同。

Notes:N:normal distribution, LN:Logarithmic normal distribution.NE:northeast, NW:northwest, SW:southwest, SE:southeast. The same below.

4个区域土壤有机质、全磷、全氮含量均为8月高于5月。对5、8月不同区域土壤养分含量变化差异性分析表明,东北部、东南部土壤有机质均变化显著( $P<0.05$ ),西北部、西南部土壤有机质变化均不显著( $P>0.05$ )。土壤全磷除东北部外,其他区域土壤全磷含量均变化显著( $P<0.05$ ),土壤全氮含量除东北部变化显著外( $P<0.05$ ),其他区域土壤全氮变化均不显著( $P>0.05$ )。

有机质、全磷、全氮平均含量变化范围为6.97~12.21、0.31~1.25、0.39~1.17  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。从变异程度来看,土壤养分5月变异系数均大于8月,变异系数范围在10%~80%,属于中等强度变异。参照全国土壤养分等级划分标准<sup>[22]</sup>可知,5、8月土壤有机质、全氮处于4~5级,土壤全磷在2~4级之间,土壤养分总体较为贫瘠。

## 2.2 艾比湖湿地土壤水分-盐分-养分空间分布的影响因素分析

根据半方差函数理论及计算模型得出不同区域

土壤因子变异函数模型及相关参数<sup>[23]</sup>(表2),表中 $C_0$ 为块金值, $C_0+C$ 为基台值, $C_0/(C_0+C)$ 表明土壤性质空间相关性的程度高低, $C_0/(C_0+C)$ 小于25%,表现为强空间相关性,主要受结构性因素影响,25%~75%之间是中等空间相关性,受结构性与随机性因素影响,大于75%,空间相关性较弱,主要为随机性因素影响。5、8月西北部土壤盐分符合指数与球状模型,东北、西南、东南部土壤盐分符合高斯模型;4个区域土壤含水量与土壤pH均符合高斯模型,不同区域土壤养分符合高斯、指数、球状模型,其中高斯模型居多。从决定系数来看,在5、8月4个区域不同的理论模型变化范围为31%~96%。从块金系数来看,不同区域土壤含水量块金系数小于34%;除5月西南部外,土壤pH块金系数均小于25%;土壤盐分块金系数均小于25%;除5月东北部外,土壤养分块金系数均小于25%,表现出强烈的空间自相关性。说明影响其空间

表2 5、8月份土壤含水量、盐分与pH、养分的半方差函数类型及其参数

Table 2 Types of semi-variance model and their parameters for soil moisture, salinity, pH and nutrient in May and August

土壤因子 Soil factor	区域 Area	理论模型 Models		块金值Nugget $C_0$		基台值Sill $C_0+C$		块金系数Nugget/sill $C_0/(C_0+C)$		变程Range $A_0/m$		决定系数 $R^2$ Coefficient of determination		残差 Residual	
		5月	8月	5月	8月	5月	8月	5月	8月	5月	8月	5月	8月	5月	8月
		含水量/ $g \cdot kg^{-1}$	NE	G	G	0.45	0.44	2.10	2.89	0.22	0.15	17 040	18 080	0.68	0.69
	NW	G	G	0	0	0.14	0.17	0	0	3960	4160	0.55	0.64	0.01	0.01
	SW	G	G	0.06	0.15	2.12	2.32	0.03	0.07	27 840	20 320	0.79	0.79	0.20	0.58
	SE	G	G	0.18	0.46	0.69	1.41	0.26	0.33	16 670	12 660	0.78	0.72	0.02	0.18
盐分/ $g \cdot kg^{-1}$	NE	G	G	0.10	0.02	1.11	0.58	0.09	0.03	17 730	11 130	0.90	0.91	0.01	0.01
	NW	E	S	0	0.03	0.65	0.24	0	0.11	19 780	20 170	0.80	0.87	0.02	0
	SW	G	G	0.06	0.01	0.34	0.15	0.16	0.07	7950	6460	0.42	0.35	0.14	0.03
	SE	G	G	0.67	0.29	3.35	2.59	0.20	0.11	25 260	22 280	0.63	0.79	0.34	0.17
pH	NE	G	G	0	0	0.01	0.01	0.07	0.07	16 120	15 970	0.72	0.72	0	0
	NW	G	G	0	0	0	0	0	0	4090	4100	0.62	0.62	0	0
	SW	G	G	0	0	0.01	0.02	0.27	0.24	15 040	24 150	0.69	0.71	0	0
	SE	G	G	0	0	0.01	0.01	0.04	0.14	29 590	7700	0.61	0.67	0	0
有机质/ $g \cdot kg^{-1}$	NE	G	G	0.09	0	0.26	0.02	0.34	0.24	17 780	9900	0.48	0.82	0	0
	NW	G	G	0.08	0	0.36	0.21	0.22	0	12 020	3980	0.73	0.65	0.01	0.01
	SW	G	G	0.06	0.13	0.54	0.63	0.11	0.21	9660	9760	0.65	0.80	0.15	0.08
	SE	E	E	0	0	0.12	0.08	0	0	12 620	10 760	0.48	0.40	0	0
全磷/ $g \cdot kg^{-1}$	NE	G	G	0	0	0.03	0.03	0.12	0.07	19 660	16 770	0.96	0.83	0	0
	NW	G	G	0	0	0.06	0.07	0	0	4130	4630	0.76	0.82	0	0
	SW	S	S	0.02	0.01	0.29	0.17	0.06	0.04	8480	7800	0.33	0.31	0.07	0.03
	SE	G	G	0	0	0.28	0.10	0	0	4280	4440	0.57	0.42	0.03	0.01
全氮/ $g \cdot kg^{-1}$	NE	G	S	0.07	0.02	0.21	0.12	0.32	0.20	10 060	16 170	0.55	0.51	0.01	0
	NW	G	G	0.04	0	0.23	0.10	0.17	0	9890	4280	0.73	0.70	0.01	0
	SW	G	E	0.13	0.15	0.59	0.75	0.22	0.20	10 040	9640	0.78	0.61	0.07	0.12
	SE	E	S	0	0	0.12	0.16	0.02	0	10 760	13 000	0.33	0.42	0.01	0.02

注:S为球状模型;G为高斯模型;E为指数模型。

Note:S:Spherical model; G:Gaussian model; E:Exponential model.

分布的因素中,土壤盐分、pH、养分主要受结构性因素影响,土壤含水量主要受结构性因素和随机性因素共同影响。从变程来看,除西南部5、8月盐分和5月有机质变程较小之外,西北部土壤含水量、盐分、养分变程均小于其他区域土壤因子变程,这可能是由于西南部进行了引水围堰工程,西北部常年大风以及季节性放牧等使土壤水分、盐分、养分变程较小。

### 2.3 艾比湖湿地土壤水分-盐分-养分的空间相关尺度分析

Moran's  $I$ 系数可定量描述研究变量在空间上的依赖关系,可以看出空间相关性随尺度的变化<sup>[24]</sup>, $I$ 的取值为 $-1 \sim 1$ , $I > 0$ 表示变量在空间上呈现正相关; $I < 0$ 表示研究变量在空间上呈现负相关; $I = 0$ 表示研究变量在空间依赖性小或空间随机变异较大。从图2、图3看出,研究区5月土壤盐分、含水量、pH和全磷的空

间距离分别在15 013.07、15 013.07、20 367.99 m和34 085.39 m之前表现出强的正相关性,随着距离增大,负相关性增强。8月土壤盐分、含水量、pH和全磷随距离增加与5月有相似的Moran's  $I$ 系数变化趋势。5、8月土壤盐分、pH、养分的Moran's  $I$ 系数波动均较大,空间相关性较强,这与地貌、微地形、气候、土壤类型等因素密切相关。

### 2.4 艾比湖湿地土壤水盐-养分空间分布特征

为了能更直观辨别土壤因子空间分布情况,通过普通克里金插值预测<sup>[17]</sup>艾比湖湿地环湖土壤含水量、盐分、pH与养分空间格局分布,从图4、图5可知,5、8月土壤含水量空间分布呈现不规则的条带状分布,其高值区出现在西北部科克巴斯陶与西南部引水围堰区,低值区主要在东南部与东北部;土壤盐分有比较明显的空间变化,高值区主要在西北部与东南部,低

值区主要在西南部引水围堰区与东北部奎屯河下游;土壤pH整体偏碱性,高值区主要在西北部及湖周围;不同区域土壤养分变化各不相同,土壤有机质、全氮有一定的相似性,高值区出现在西北、西南部,土壤全磷呈无规则斑点状分布,高、低值地区较为分散。对艾比湖湿地土壤盐分与水分、水分与养分及养分之间进行相关性分析,5月份土壤盐分与pH值(0.21,相关性系数,下同)呈正相关;土壤盐分与含水量(0.294),含水量与有机质(0.302)呈显著性相关( $P<0.05$ );含水量与全氮(0.355),pH值与有机质(0.396)、全氮(0.445),全氮与有机质(0.896)、全磷(0.326)呈极显著性相关( $P<0.01$ )。8月份土壤盐分与含水量

(0.296)、pH值(0.3),pH值与有机质(0.303)呈显著性相关( $P<0.05$ ),含水量与有机质(0.443)、全氮(0.466),pH值与全氮(0.381),有机质与全磷(0.349)、全氮(0.885),全磷与全氮(0.458)呈极显著性相关( $P<0.01$ )。

### 3 讨论

#### 3.1 艾比湖湿地土壤水盐-养分时间变化分析

不同区域土壤盐分、pH值8月高于5月,土壤含水量则相反,其中土壤含水量、盐分属于中等变异,土壤pH值为弱变异;5、8月土壤盐渍化在中度盐化与盐土化水平之间;pH值呈碱性或强碱性;与贡璐等<sup>[25]</sup>

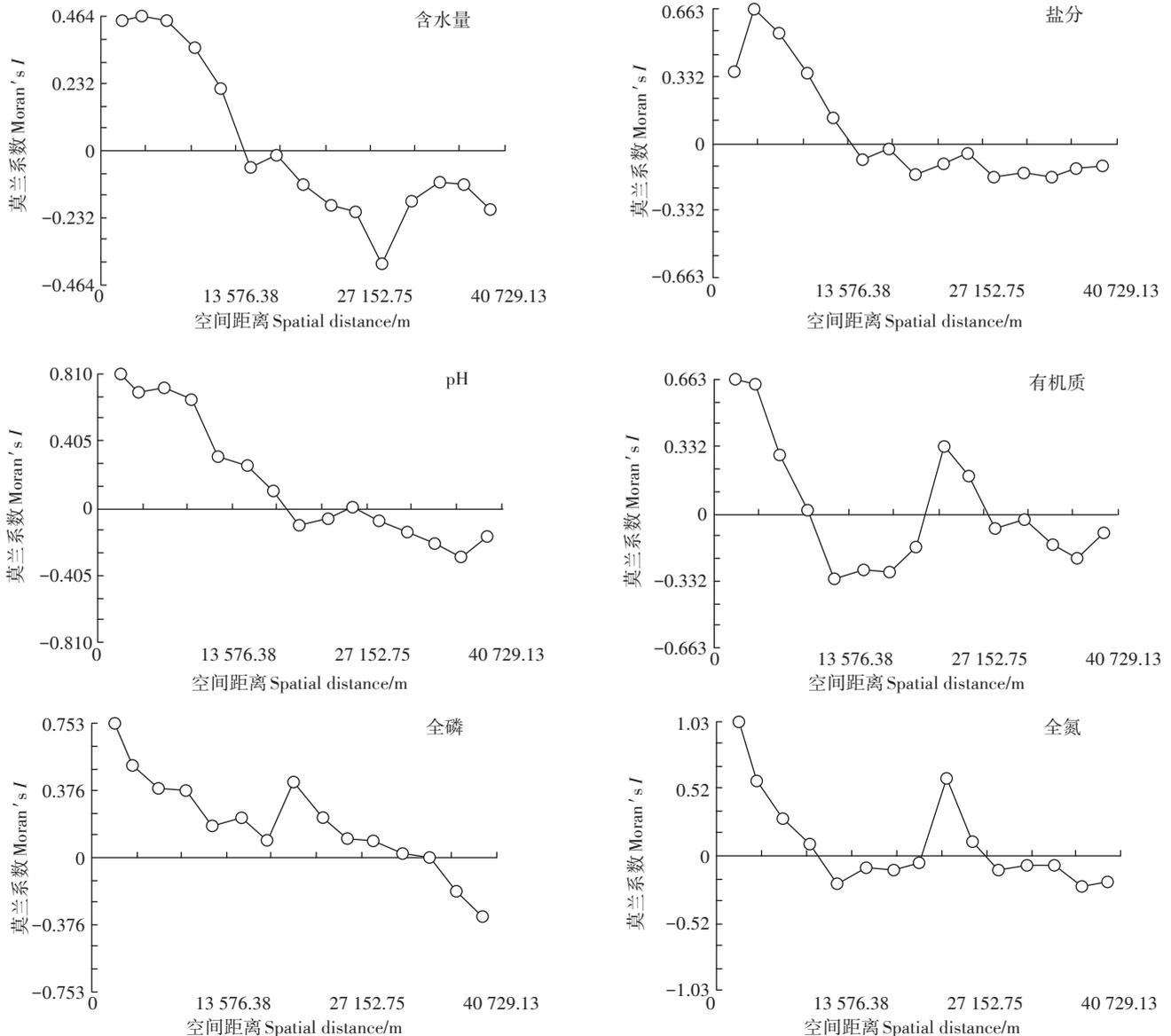


图2 5月土壤含水量、盐分、pH与养分有机质、全磷、全氮的Moran's I系数分析

Figure 2 Moran's I analysis of soil moisture, salinity, pH and nutrient organic matter, total phosphorus, total nitrogen in May

研究的干旱区土壤水盐空间变异中土壤pH值为弱变异结论相同。5、8月土壤盐分与pH值均呈正相关性,不同区域土壤盐分块金系数均小于25%,主要受结构性因素影响,已有研究表明<sup>[26]</sup>季节性积盐和脱盐交替是土壤碱化和土壤pH值变化的重要原因,说明干旱区湖泊湿地土壤盐分、pH值季节变化主要是结构性因素影响(如地形、土壤类型、母质、水文等)。5、8月土壤含水量块金系数小于34%,说明干旱地区湖泊湿地土壤含水量季节变化受到结构性因素(气候、地形、土壤类型等)和随机性因素(灌溉、土壤改良、耕作措施等人为活动)共同影响,这可能是艾比湖湿地河流上游农业灌溉用水较多,河流径流量季节变化<sup>[27]</sup>

影响了湖泊水位与地下水埋深,2015年5、8月水位计实时监测湖泊水位变化范围分别为0.85~1.17 m和0.60~0.78 m,地下水埋深变化范围分别为0.65~1.02 m和1.69~1.97 m;5、8月土壤含水量与土壤养分之间相关性较显著,而不同区域土壤含水量、养分含量存在差异,研究区土壤养分总体较为贫瘠,5月土壤养分块金系数小于35%,而8月土壤养分块金系数小于25%,说明其空间自相关性较强且主要由结构性因素引起(土壤类型、植被群落、气候等),这可能是艾比湖湿地成土母质以冲击-洪积物质类型的砂壤土为主,发育程度较低且土壤沙化严重,干旱、高温的气候条件下,好气微生物比较活跃,有机质进行好氧分解,不

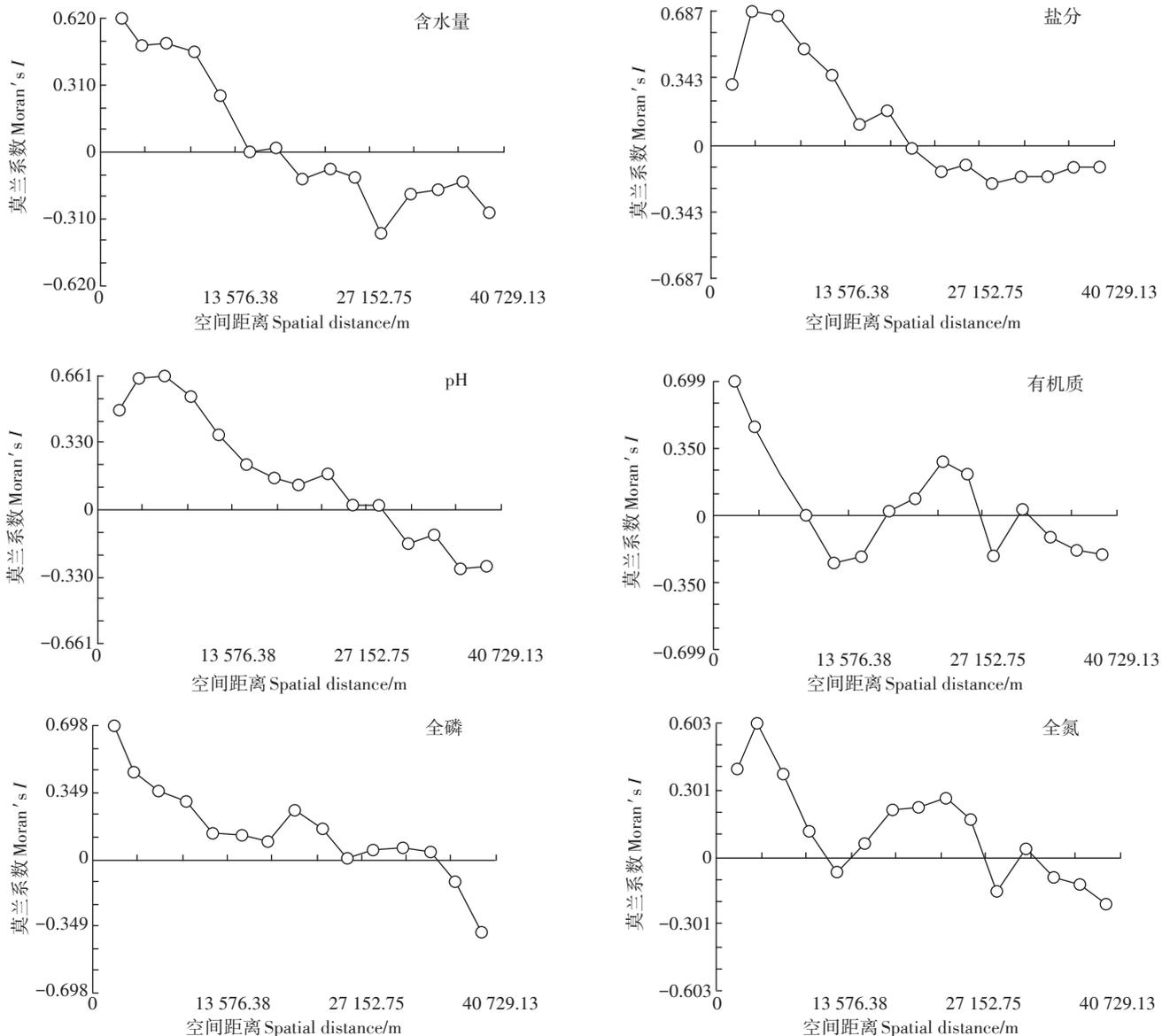


图3 8月土壤含水量、盐分、pH与养分有机质、全磷、全氮的Moran's I系数分析

Figure 3 Moran's I analysis of soil moisture, salinity, pH and nutrient organic matter, total phosphorus, total nitrogen in August

利于累积,而土壤有机质是土壤养分的载体和来源,在维持土壤结构、保持土壤水分、形成土壤肥力方面有重要影响,碱化现象明显破坏土壤结构,植物群落衰退使得生物累积与凋落物返还过程减弱,不利于土壤质量改善,从而使土壤肥力降低<sup>[28]</sup>。

### 3.2 艾比湖湿地土壤水盐-养分空间异质性分析

5、8月土壤含水量空间分布呈现不规则的带状分布,其高值区出现在西北部科克巴斯陶与西南部引水围堰区,低值区主要在东南部与东北部,土壤有机质与全氮的高值区与含水量高值区相近似。可能西北部科克巴斯陶有天然泉水流出,西南部有精河、博

河注入艾比湖,湖滨湿地土壤主要以细砂、黏土等组成,而东北部奎屯河与东南部阿奇克苏河已断流,土壤为沙地,透水透气性好;西北部科克巴斯陶水源充足有利于植物群落生长,西南部进行土壤改良工程使土壤质地得到改善,土壤盐分较低,植被恢复良好,为土壤养分积累提供有利条件<sup>[29]</sup>。土壤盐分高值区主要在西北部与东南部,低值区主要在西南部引水围堰区与东北部奎屯河下游,这与金海龙等<sup>[30]</sup>在2009年研究发现艾比湖土壤盐分高值区在湖东部不同,说明近几年艾比湖湿地土壤盐渍化与沙化日益严重。西北部与东南部干涸湖底面积较大,土壤主要为盐土,

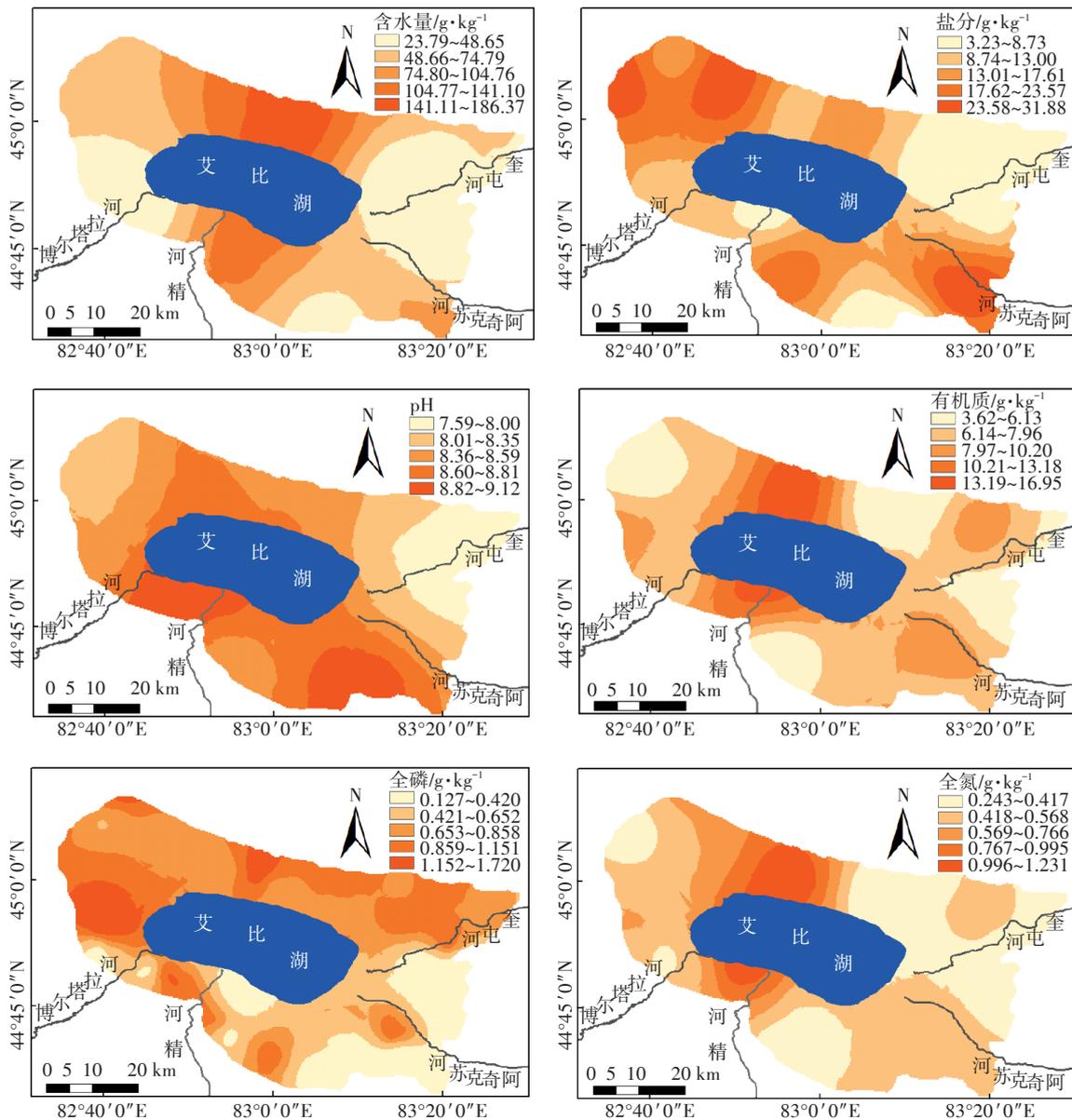


图4 5月土壤含水量、盐分、pH、养分空间分布

Figure 4 Spatial distribution of soil moisture, salinity, pH and nutrient in May

强烈的蒸发作用使干涸湖底土壤中可溶性盐分随水分蒸发聚于地表,东南部在阿拉山口的径直通道上,盐尘加剧了荒漠景观的发育;奎屯河下游土壤沙化严重,土壤沙化后土壤肥力降低,土壤颗粒变细,土壤盐分含量减少<sup>[31]</sup>。不同区域土壤有机质、全氮空间变化有一定的相似性,土壤全磷呈无规则斑点状分布,高、低值地区较为分散,与杜改俊等<sup>[16]</sup>、朱海强等<sup>[32]</sup>研究的艾比湖土壤养分相似。从空间相关尺度分析,研究区5、8月土壤水盐-养分在空间距离上均表现出强正相关性, Moran's *I* 系数波动均较大,空间相关性较强,这与贾晓红等<sup>[33]</sup>研究的干旱区农田土壤性状均呈

较弱的相关关系不同,这可能是艾比湖湿地环湖人为因素影响较小,土壤水盐-养分主要受近湖边土壤含水量及湖面波动,土壤结构、植物群落等影响较为复杂。

#### 4 结论

(1)不同区域土壤盐分、养分、pH值8月高于5月,土壤含水量则相反。除土壤盐分外,5、8月不同区域土壤pH值、含水量与养分含量变化差异较显著,土壤含水量、盐分、养分属于中等变异,土壤pH值为弱变异。研究区土壤盐渍化在中度-盐土化水平之

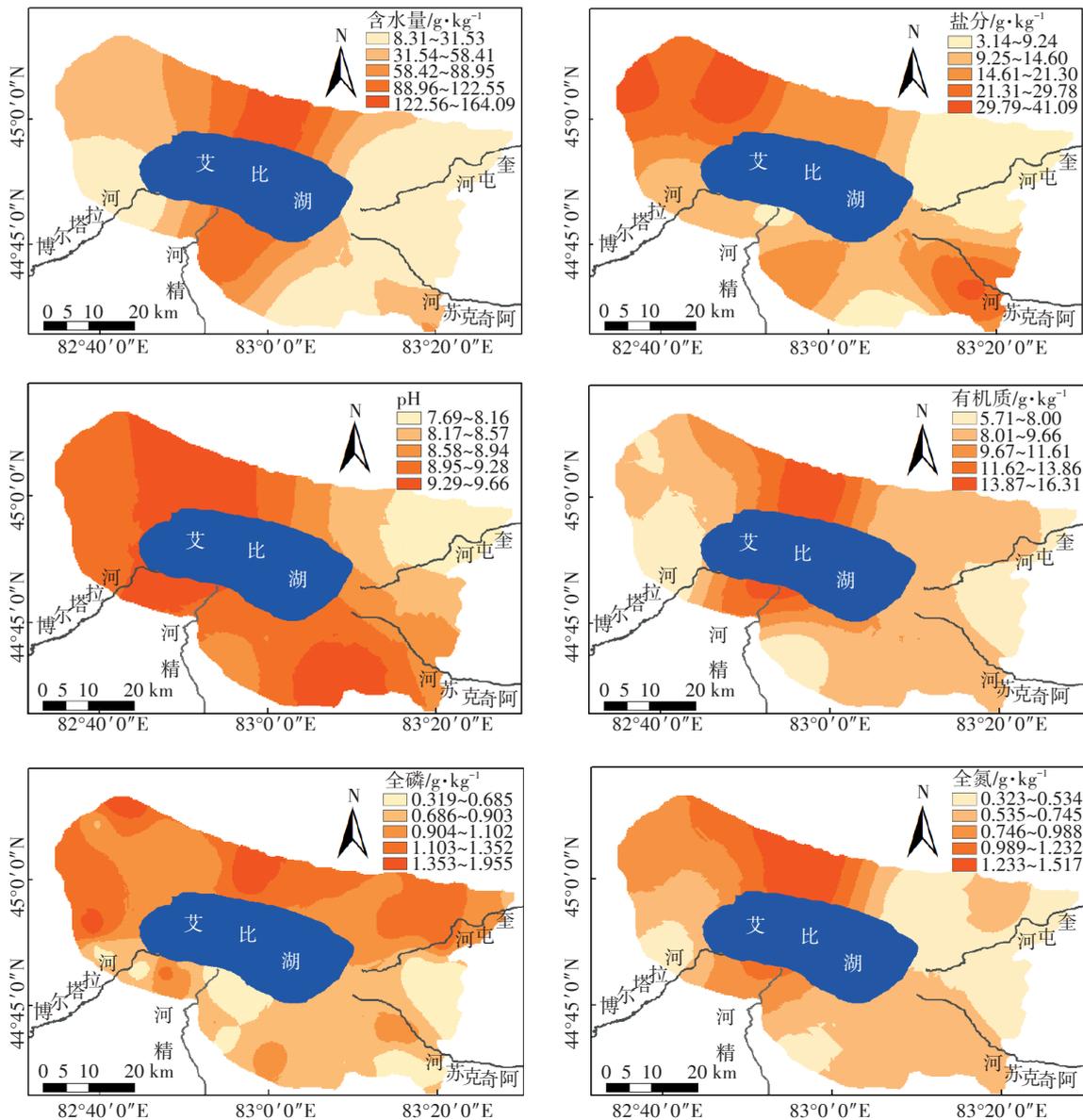


图5 8月土壤含水量、盐分、pH、养分空间分布

Figure 5 Spatial distribution of soil moisture, salinity, pH and nutrient in August

间,土壤呈碱性或强碱性,总体较为贫瘠。

(2)5、8月不同区域土壤盐分、pH值、含水量、养分符合不同的半方差模型,土壤含水量受结构性因素(气候、地形、土壤类型等)和随机性因素(灌溉、土壤改良、耕作措施等人为活动)共同影响,土壤盐分、pH值与养分主要受结构性因素(土壤类型、母质、植被群落、水文等)影响;5、8月土壤盐分、pH值、养分的Moran's I系数波动均较大,空间相关性较强。

(3)5、8月土壤含水量呈带状分布;土壤盐分高值区主要在西北部与东南部;土壤pH高值区主要在西北部及湖周围;土壤有机质、全氮有一定的相似性且呈极显著的正相关,高值区主要在西北、西南部,土壤全磷呈无规则斑点状分布,高、低值区较为分散。

**致谢:**感谢师哥赵明亮、刘岩、王金龙、朱海强和师姐马雯在野外采集样品与室内实验分析中所做的指导与帮助。

#### 参考文献:

- [1] 张华兵,刘红玉,李玉凤,等.自然条件下盐城海滨湿地土壤水分盐度空间分异及其与植被关系研究[J].环境科学,2013,34(2):540-546.  
ZHANG Hua-bing, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, et al. Spatial variation of soil moisture/salinity and the relationship with vegetation under natural conditions in Yancheng coastal wetland[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(2):540-546.
- [2] 高凤杰,马泉来,韩文文,等.黑土丘陵区小流域土壤有机质空间变异及分布格局[J].环境科学,2016,37(5):1915-1922.  
GAO Feng-jie, MA Quan-lai, HAN Wen-wen, et al. Spatial variability and distribution pattern of soil organic matter in a mollisol watershed of China[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(5):1915-1922.
- [3] Ma F, Li X, Zhang J, et al. Spatial heterogeneity of soil moisture in Shapotou sand-fixing artificial vegetation area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(5):789-795.
- [4] Florinsky I V, Eilers R G, Manning G R, et al. Prediction of soil properties by digital terrain modelling[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2002, 17(3):295-311.
- [5] Lost S, Landgraf D, Makeschin F. Chemical soil properties of reclaimed marsh soil from Zhejiang Province P. R. China[J]. *Geoderma*, 2007, 142(3/4):245-250.
- [6] Tanner C C, D'Eugenio J, McBride G B, et al. Effect of water level fluctuation on nitrogen removal from constructed wetland mesocosms[J]. *Ecological Engineering*, 1999, 12(1/2):67-92.
- [7] 刘占锋,傅伯杰,刘国华,等.土壤质量与土壤质量指标及其评价[J].生态学报,2006,26(3):901-913.  
LIU Zhan-feng, FU Bo-jie, LIU Guo-hua, et al. Soil quality: Concept, indicators and its assessment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3):901-913.
- [8] Gaston L, Locke M, Zablutowicz R, et al. Spatial variability of soil properties and weed populations in the Mississippi Delta[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(2):449-459.
- [9] Sylla M, Stein A, Nvan B, et al. Spatial variability of soil salinity at different scales in the mangrove rice agro-ecosystem in west Africa[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 1995, 54(1/2):1-15.
- [10] 白娜,王立,孔东升.黑河自然保护区沼泽湿地土壤化学性质的空间分布特征研究[J].草业学报,2017,26(5):15-28.  
BAI Na, WANG Li, KONG Dong-sheng. Spatial distribution and chemical properties of marsh wetland soil in the Heihe Nature Reserve[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(5):15-28.
- [11] 刘凯,李希来,金立群,等.黄河源湖泊湿地退化过程土壤和植被的变化特征[J].生态科学,2017,36(3):23-30.  
LIU Kai, LI Xi-lai, JIN Li-qun, et al. Characteristics of soil and vegetation in the process of lacustrine wetland degradation in the Yellow River source zone[J]. *Ecological Science*, 2017, 36(3):23-30.
- [12] 陈文业,赵明,张继强,等.敦煌西湖荒漠-湿地生态系统植被与土壤水分空间异质性研究[J].冰川冻土,2015,37(6):1670-1679.  
CHEN Wen-ye, ZHAO Ming, ZHANG Ji-qiang, et al. Spatial heterogeneity of vegetation and soil moisture in the desert-wetland ecosystem in Dunhuang Xihu, Gansu Province, China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(6):1670-1679.
- [13] 孙飞达,陈文业,袁海峰,等.甘肃敦煌西湖荒漠-湿地生态系统土壤水分空间异质性及影响因子研究[J].西北植物学报,2016,36(1):165-173.  
SUN Fei-da, CHEN Wen-ye, YUAN Hai-feng, et al. Spatial heterogeneity of soil moisture and related factors in desert-wetland ecosystem enclosed in Dunhuang Xihu, Gansu, China[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2016, 36(1):165-173.
- [14] 王盼盼,李艳红,张小萌.艾比湖湿地植物群落变化对盐分环境梯度的响应[J].生态环境学报,2015,24(1):29-33.  
WANG Pan-pan, LI Yan-hong, ZHANG Xiao-meng. Responses of plant diversity changes in the wetland of Lake Ebinur to salinity environment gradient[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(1):29-33.
- [15] 王勇辉,马蓓,海米提·依米提.艾比湖主要补给河流下游河岸带土壤盐分特征[J].干旱区研究,2013,30(2):196-202.  
WANG Yong-hui, MA Bei, HAMID Yimit. Soil salinity in the riparian zone in lower reaches of the main feeding rivers of the Ebinur Lake[J]. *Arid Zone Research*, 2013, 30(2):196-202.
- [16] 杜改俊,李艳红,张小萌,等.艾比湖湿地典型植物群落土壤养分和盐分的空间异质性[J].生态环境学报,2015,24(8):1302-1309.  
DU Gai-jun, LI Yan-hong, ZHANG Xiao-meng, et al. Spatial heterogeneity of the soil nutrient and salinity of the typical plant communities in Ebinur Lake wetland[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(8):1302-1309.
- [17] 赵明亮,李艳红,李发东.新疆艾比湖湿地土壤水盐空间变异性分析[J].湖泊科学,2016,28(6):1328-1337.  
ZHAO Ming-liang, LI Yan-hong, LI Fa-dong. Analysis of the spatial variability of soil moisture and salinity in Ebinur Lake wetlands, Xinjiang[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, 28(6):1328-1337.
- [18] 张飞,王娟,塔西甫拉提·特依拜,等.1998—2013年新疆艾比

- 湖湖面时空动态变化及其驱动机制[J]. 生态学报, 2015, 35(9): 2848-2859.
- ZHANG Fei, WANG Juan, TASHPOLAT Tiyp, et al. The spatial and temporal dynamic changes and driving forces in the surface area of Ebinur Lake from 1998—2013[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(9):2848-2859.
- [19] 张 韪. 土壤, 水, 植物理化分析教程[M]. 北京: 中国林业出版社, 2011.
- ZHANG Wen. Soil, water and plant physico-chemical analysis tutorial [M]. Beijing: China Forestry Press, 2011.
- [20] 胡克林, 李保国, 林启美, 等. 农田土壤养分的空间变异性特征[J]. 农业工程学报, 1999, 15(3):33-38.
- HU Ke-lin, LI Bao-guo, LIN Qi-mei, et al. Spatial variability of soil nutrient in wheat field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1999, 15(3):33-38.
- [21] 新疆农业厅, 新疆土壤普查办公室. 新疆土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- Xinjiang Department of Agriculture, Xinjiang Soil Survey Office. The soil of Xinjiang[M]. Beijing: Science Press, 1996.
- [22] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- China Soil Survey Office. The soil of China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998.
- [23] 郭旭东, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 河北省遵化平原土壤养分的时空变异特征—变异函数与Kriging插值分析[J]. 地理学报, 2000:55(5): 555-566.
- GUO Xu-dong, FU Bo-jie, CHEN Li-ding, et al. The spatio-temporal variability of soil nutrients in Zunhua Plain of Hebei Province: Semivariogram and Kriging analysis[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(5):555-566.
- [24] 高 扬, 汪亚峰, 何念鹏, 等. 不同土地利用方式下崇明岛土壤酶与有机质空间分布特征[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1):21-28.
- GAO Yang, WANG Ya-feng, HE Nian-peng, et al. Spatial distribution characteristic of soil enzymes activity and organic matter under different land use management Chongming Island[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1):21-28.
- [25] 贡 璐, 韩 丽, 任曼丽, 等. 塔里木河上游典型绿洲土壤水盐空间分异特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4):251-255, 278.
- GONG Lu, HAN Li, REN Man-li, et al. Spatial variability of soil water-salt in a typical oasis on the upper reaches of the Tarim River[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(4):251-255, 278.
- [26] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- HUANG Chang-yong. Pedometrics[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [27] 许 宁. 耕地面积变化和艾比湖入湖水量的关系研究[D]. 新疆: 新疆大学, 2013.
- XU Ning. Study on the relationship of cultivated land area change in Ebinur Lake water into the lake: Case study of Boertala River and Jinghe River Basin[D]. Xinjiang: Xinjiang University, 2013.
- [28] 廖和平, 沈 琼, 谢德体. 中国耕地资源及其可持续利用[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2002(3):408-411.
- LIAO He-ping, SHEN Qiong, XIE De-ti. Resources of cultivated land and sustainable use in China[J]. *Journal of Southwest China Normal University(Natural Science Edition)*, 2002(3):408-411.
- [29] 毋兆鹏, 金海龙, 王范霞. 艾比湖退化湿地的生态恢复[J]. 水土保持学报, 2012, 26(3):211-215, 221.
- WU Zhao-peng, JIN Hai-long, WANG Fan-xia. Eco-restoration of degenerative wetland in AIBI Lake region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(3):211-215, 221.
- [30] 金海龙, 白 祥, 满中龙, 等. 新疆艾比湖湿地自然保护区土壤空间异质性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(2):150-157.
- JIN Hai-long, BAI Xiang, MAN Zhong-long, et al. Space difference of soil in Xinjiang Ebinur Lake wetland natural reserve district[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, 24(2):150-157.
- [31] 夏训诚, 胡文康. 塔克拉玛干沙漠资源与环境[J]. 中国科学. B辑, 1993, 23(8):889-896.
- XIA Xun-cheng, HU Wen-kang. Resources and environment of Taklimakan Desert[J]. *Science in China:Series B*, 1993, 23(8):889-896.
- [32] 朱海强, 李艳红, 张小萌. 艾比湖湿地不同植物群落下土壤全磷空间变异[J]. 水土保持研究, 2017, 24(5):45-50.
- ZHU Hai-qiang, LI Yan-hong, ZHANG Xiao-meng. Spatial variability of soil total phosphorus in different plant communities of Ebinur Lake wetland[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(5):45-50.
- [33] 贾晓红, 李新荣, 周海燕, 等. 黄灌沙区农田耕层土壤性状空间异质性分析[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5):103-106.
- JIA Xiao-hong, LI Xin-rong, ZHOU Hai-yan, et al. Spatial heterogeneity analysis of soil property at plough horizon of farm land by irrigating using Yellow River in arid deser region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(5):103-106.