

# 黄河上游半干旱盐渍区柽柳群落土壤水盐空间变化\*

杨本漫 王若水\*\* 肖辉杰 曹琪琪 刘涛

北京林业大学水土保持学院 北京 100083

**摘要** 为促进黄河上游半干旱盐渍区植被群落营造与生态恢复,利用样地调查法,于2016年7月对宁夏引黄灌区次生盐碱地天然柽柳群落进行调查,采用经典统计学与地统计学方法,对柽柳群落影响下的土壤水盐空间分布特征及其响应关系进行分析。结果表明:研究区土壤水分普遍较低(1.98%-7.55%),盐渍化程度高(平均电导率10.28-25.38 mS/cm),土壤水盐变异系数为36.1%-83.7%,均属于中等程度变异,且土壤盐分变异程度随土层深度增加而减小。样地土壤水盐均具有明显的空间结构特征,块金系数为0.04%-49.88%,主要受到结构性因素影响或结构性因素与随机因素的共同影响,空间相关性较强。各样地柽柳群落土壤水盐的空间分布呈斑块状格局,土壤水盐高值区域与柽柳集中分布区域较为一致。相关分析表明土壤水分与盐分间呈正相关关系。综上所述,黄河上游半干旱盐渍区土壤水盐制约着柽柳的群落分布与生长状况,柽柳的生长与分布也增强了土壤水盐的空间变异性。(图3 表9 参31)

**关键词** 柽柳群落; 土壤含水量; 电导率; 空间分布; 盐碱地

CLC S154.1

## Spatial variability in soil water and salinity in *Tamarix* community in a semiarid saline region of the upper Yellow River\*

YANG Benman, WANG Ruoshui\*\*, XIAO Huijie, CAO Qiqi & LIU Tao

College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

**Abstract** *Tamarix* is widely distributed in semiarid saline regions of the upper Yellow River. The community of *Tamarix* affects the spatial distribution of soil water and salinity. It is important to explore the dynamic response relationship of *Tamarix* community and spatial distribution of soil water and salinity in order to evaluate the effects of vegetation community construction and ecological restoration in this region. The natural *Tamarix* community in the secondary saline-alkali land of the Ningxia Yellow River Irrigation Area was investigated in July 2016. Classical statistics and geostatistics were used to analyze the spatial distribution characteristics of soil water and salinity. The results showed that the soil water content was relatively low (1.98%-7.55%), whereas the soil salinity was high (average conductivity 10.28-25.38 mS/cm) in the study area. The variability coefficient range of soil water and salinity was 36.1%-83.7%, both with moderate variations. Furthermore, the variation degree of soil salinity decreased with the increase in soil depth. The soil water and salinity had obvious spatial structure characteristics, which was mainly affected by structural factors or structural factors associated with stochastic factors. The coefficients of nugget were 0.04%-49.88%, indicating the strong spatial correlation. The spatial distribution of soil water and salinity in *Tamarix* community showed a patchy pattern; the soil water and salinity distribution in the areas with high *Tamarix* growing density were considerably high. The correlation analysis showed that there was a positive correlation between soil water and salinity in the study area. In conclusion, soil water and salinity restrict the distribution and growth of *Tamarix*. Furthermore, the distribution and growth of *Tamarix* enhanced the spatial variability of soil water and salinity.

**Keywords** *Tamarix* community; soil water content; electrical conductivity; spatial distribution; saline-alkali soil

柽柳(*Tamarix*)是黄河上游半干旱盐渍区常见的树种,种类分布达10种以上,属于典型的泌盐盐生植物,极耐盐碱、沙荒地,是优良的水土保持和盐碱地造林树种<sup>[1]</sup>。已有研究表明,柽柳能引起土壤盐分在植株周围富集并在其冠下形

成“盐岛”,这是柽柳对土壤盐分小尺度空间异质性影响的体现<sup>[2-4]</sup>。此外柽柳对土壤水分的影响因环境不同而异:Xia等通过盆栽实验发现柽柳种植降低了土壤含水量<sup>[5]</sup>;而关洪斌等在山东滨海盐渍区发现柽柳根系土壤的贮水能力明显高于空地,认为柽柳能提高土壤含水量<sup>[6]</sup>。大面积的柽柳群落亦会影响区域的土壤水盐分布,而土壤水盐的时空分布也决定着其他类型植被的空间格局。封晓辉等对滨海重盐碱地不同树龄的人工柽柳林进行群落调查,发现稳定的群落环境不仅促进土壤表层盐分含量降低,也促进了物种多样性的增加和群落的进展演替<sup>[7]</sup>。

收稿日期 Received: 2017-08-18 接受日期 Accepted: 2017-09-17

\*国家林业公益性行业科研专项(201504402)和中央高校基本科研业务费专项(2016ZCQ06, 2017PT12)资助 Supported by the Forestry Industry Research Special Funds for Public Welfare Project of China (201504402) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (2016ZCQ06, 2017PT12)

\*\*通讯作者 Corresponding author (E-mail: wrsily\_2002@163.com)

黄河上游盐渍区是内陆半干旱地区次生盐碱地的典型代表, 多位于引黄灌区, 降雨不均、地下水位浅、矿化度高等特殊水文环境使土壤水盐空间分布更为复杂。土壤和植被是生态系统中相互依存的两大因子。在干旱或半干旱区, 土壤水分是植被格局形成和演变最重要的限制因子, 而植被状况亦是土壤水分空间异质性的主要驱动因子<sup>[8-10]</sup>。土壤水分是盐分运动的载体, 土壤水盐的空间特征在较大程度上影响着区域植被的稳定, 对区域植被群落结构及其生长繁衍都具有重要的影响<sup>[11-13]</sup>。柽柳作为该区域广泛分布的植被群落, 掌握其土壤水盐空间变异特征, 是在该区域进行植被恢复和生态建设的重要前提。目前, 柽柳林对土壤水盐空间异质性的影响研究多集中于干旱荒漠区和滨海盐渍区<sup>[14-15]</sup>, 而对于黄河上游半干旱盐渍区柽柳林空间变异特征尚待进一步研究; 已有的研究主要侧重于单株尺度柽柳的土壤水盐空间分布<sup>[16]</sup>, 但在群落尺度下因柽柳分布、生长差异, 其土壤水盐空间分布势必比单株尺度更为复杂, 仅依靠单株柽柳对土壤水盐空间分布的影响难以确定区域植被恢复与配置的合理性, 因此有必要对群落尺度下柽柳的土壤水盐空间变异进行研究。

本研究采用样地调查法, 结合经典统计学与地统计学分析方法, 旨在研究(1)黄河上游半干旱盐渍区典型柽柳群落土壤水盐的空间分布特征, (2)柽柳的生长、分布与土壤水盐间的响应关系, 以期为该盐渍区更合理地保护、利用和恢复自然植被, 更科学地进行植被建设和营林实践提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于宁夏回族自治区吴忠市青铜峡市小坝镇( $38^{\circ}01'N$ ,  $105^{\circ}56'E$ ), 属银川平原引黄灌区, 地处黄河上游, 海拔1 139 m。属中温带大陆性气候, 干旱少雨, 日照充足, 年平均日照时数2 955 h, 年平均气温8.3-8.6 °C, 年平均蒸发量1 296 mm, 全年无霜期176 d。年平均降雨量260.7 mm, 年内分配极端不均, 夏秋多, 冬春少, 降水相对集中。实验区地下水埋深1.2-1.5 m左右, 地下水位受到灌期影响, 在灌溉季节上升, 非灌溉季节下降<sup>[17]</sup>。地下水矿化度为3-13 g/L。研究区内由于长期引黄河水漫灌, 次生盐渍化现象严重。区内分布的主要植被有柽柳、芦苇(*Phragmites australis*)、碱蓬(*Suaeda salsa*)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)和冰草(*Agropyron cristatum*)等。研究样地设在青铜峡灌区盐碱地天然柽柳林内, 土壤质地为砂质土, 样地植被以柽柳和碱蓬为主。

### 1.2 野外取样调查方法

1.2.1 研究对象 经过野外踏查, 于2016年7月在青铜峡灌区盐碱地天然柽柳林内选取地形条件相对一致之处, 设置3

个相邻的代表性柽柳灌丛调查样地, 样地规格为20 m × 20 m。调查各样地内每株柽柳的高度、地径和冠幅, 并用GPS进行定位。各样地柽柳的基本概况见表1。样地2内柽柳株高和地径最大, 且密度最小; 样地3内柽柳株高和地径最小, 密度居中。在每个样地内随机设置5个1 m × 1 m的小样方, 调查样方内草本植物的种类、密度、盖度、高度等, 结果见表2。样地内草本植被以灰绿碱蓬和盐地碱蓬为主, 其余仅零星分布。

表3为各样地0-60 cm深度土壤基本理化性质。从表3可以看出, 柽柳林地土壤颗粒组成以砂粒为主, 按照国际分类标准属于砂质土。各样地土壤电导率与钠吸附比值均偏高, 且样地2>样地1>样地3; pH值则偏低, 且样地3>样地1>样地2。按盐渍土类型划分标准<sup>[18]</sup>, 样地土壤属于钠质盐土(Saline-sodic soil)。

1.2.2 采样点布设 土样采用均匀网格法采集, 如图1所示, 将20 m × 20 m的样地等间距划分为25个4 m × 4 m的小样方, 以每个小样方的中心点为采样点, 用土钻(直径5 cm)采集土样。采样深度为0-20 cm、20-40 cm、40-60 cm。于2016年7月20-22日集中采样, 采样前一周左右无降水。采样时记录每一采样点坐标、植被类型及周围地貌特征。采集的土样一部分装入铝盒用于测定土壤含水量; 剩余部分用塑料自封袋装回, 测定土壤盐分。

### 1.3 室内测定与分析

土壤含水量采用烘干法(105 °C, 12 h)测定。用于测定盐分的土样自然风干并磨碎后, 过1 mm筛, 参照美国盐土实验室的方法制备土壤饱和浸提液<sup>[19]</sup>。用电导仪(DDS-307, 上海)和pH计(PHS-3C, 上海)分别测定土壤饱和浸提液电导率EC<sub>e</sub>和pH<sub>e</sub>。用激光粒度分析仪(Microtrac S3500, 美国)测定土壤机械组成。用电感耦合等离子体光谱仪(ICP-OES, 美国)测定土壤饱和浸提液中Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>含量并计算钠吸附比(SAR<sub>e</sub>)。

### 1.4 数据处理

采用经典统计学方法计算土壤水分和盐分的特征值, 数据用SPSS18.0统计软件进行分析, 对不同样地和不同土层的土壤水盐数据进行单因素方差分析(One-way ANOVA), 对土壤水分、盐分和柽柳生长指标之间进行Pearson相关性检验, 并在地统计学分析前用K-S法对土壤水盐数据进行正态分布检验; 应用GS<sup>+</sup> 9.0软件进行半方差函数分析; 空间插值采用Surfer13.0软件中的克里格模块; 用Auto CAD 2007绘制样地内采样点与柽柳分布图。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤水盐的描述性统计分析

经单样本K-S检验, 研究样地各土层土壤含水量和电导率均服从正态分布。从表4可以看出, 各土层平均含水量在

表1 不同样地柽柳的基本概况

Table 1 The basic facts of *Tamarix* in different plots

样地 Plot	柽柳灌丛数 Number	株高 Height (h/cm)		地径 Ground diameter (d/cm)		冠幅 Crown (l/cm)		密度 Density ( <i>n/m</i> <sup>-2</sup> )
		最高 Max	平均 Mean	最高 Max	平均 Mean	EW	SN	
1	22	430	272	10.074	4.072	276	293	0.055
2	8	470	276	18.308	6.651	386	290	0.020
3	18	352	266	5.496	3.089	278	295	0.045

表2 草本层样地调查表

Table 2 Investigation of herbs

样地 Plot	植物种 Species	平均高度 Height (h/cm)	盖度 Coverage (r/%)	密度 Density ( $n/m^2$ )
1	灰绿碱蓬 <i>Suaeda glauca</i> Bunge 盐地碱蓬 <i>Suaeda salsa</i> (Linn.) Pall. 芦苇 <i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin. ex Steud 灰菜 <i>Chenopodium album</i> L. 独行菜 <i>Lepidium apetalum</i> Willd. 冰草 <i>Agropyron cristatum</i> (Linn.) Gaertn. 猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i> Waldst. et Kit. 黄花蒿 <i>Artemisia annua</i> Linn. 地肤 <i>Kochia scoparia</i> (L.) Schrad.	33.5	32.4	62
2	灰绿碱蓬 <i>Suaeda glauca</i> Bunge 芦苇 <i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin. ex Steud 芨芨草 <i>Achnatherum splendens</i> 独行菜 <i>Lepidium apetalum</i> Willd. 盐爪爪 <i>Kalidium foliatum</i> (Pall.) Moq. 冰草 <i>Agropyron cristatum</i> (Linn.) Gaertn. 灰菜 <i>Chenopodium album</i> L. 地肤 <i>Kochia scoparia</i> (L.) Schrad. 黄花蒿 <i>Artemisia annua</i> Linn.	46.1	40.8	37
3	灰绿碱蓬 <i>Suaeda glauca</i> Bunge 盐地碱蓬 <i>Suaeda salsa</i> (Linn.) Pall. 盐爪爪 <i>Kalidium foliatum</i> (Pall.) Moq. 猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i> Waldst. et Kit. 芦苇 <i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin. ex Steud 冰草 <i>Agropyron cristatum</i> (Linn.) Gaertn. 灰菜 <i>Chenopodium album</i> L. 独行菜 <i>Lepidium apetalum</i> Willd.	22.8	21.9	84

表3 土壤的基本理化性质

Table 3 The basic physicochemical characters of soil

样地 Plot	电导率 Electrical conductivity ( $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$ )	pH	钠吸附比 (SAR/mmol $^{0.5}$ L $^{-0.5}$ )	各级颗粒含量百分数 Soil particulate content (w/w%)		
				砂粒 Sand (2-0.02 mm)	粉粒 Silt (0.02-0.002 mm)	粘粒 Clay (<0.002 mm)
1	14.16	7.49	30.20	81.49	10.27	8.25
2	23.56	7.40	35.90	76.97	6.28	16.75
3	11.50	7.64	18.97	87.55	4.13	8.33

1.98%-7.55%，土壤水分普遍较低。土壤含水量大体上随土层深度的增加而增加，但0-20 cm土层含水量在样地2和3中大于20-40 cm土层。0-40 cm土层含水量为样地2>样地3>样地1，即土壤含水量随着样地内柽柳密度的增大而降低。单因素方差分析显示，样地1的40-60 cm土层含水量显著高于0-40 cm土层 ( $P < 0.05$ )，样地2和3的40-60 cm土层含水量显著高于20-40 cm土层 ( $P < 0.05$ )，样地2土壤含水量显著高于样地1和3 ( $P < 0.05$ )。变异系数CV的大小反映了土壤特性的空间变异性大小，即 $CV \leq 10\%$ 为弱变异性， $10\% < CV < 100\%$ 为中等变异性， $CV \geq 100\%$ 为强变异性<sup>[20]</sup>。各土层土壤含水量的变异

系数处于47.8%-83.7%之间，均属于中等程度变异，说明研究区土壤水分在水平方向上的差异较大。

从表5可以看出，各土层平均电导率为10.28-25.38 mS/cm，样地2的电导率显著高于样地1和3 ( $P < 0.05$ )。样地1中土壤电导率随土层深度的增加而增加，40-60 cm土层电导率显著高于0-40 cm土层 ( $P < 0.05$ )；样地2和3中土壤电导率随土层深度的增加而减小，且各土层间无显著差异。各样地电导率为样地2>样地1>样地3，即土壤电导率随着样地内柽柳株高、地径的增大而增加。各土层土壤电导率的变异系数处于36.1%-75.0%之间，均属于中等程度变异。各样地电导率的变

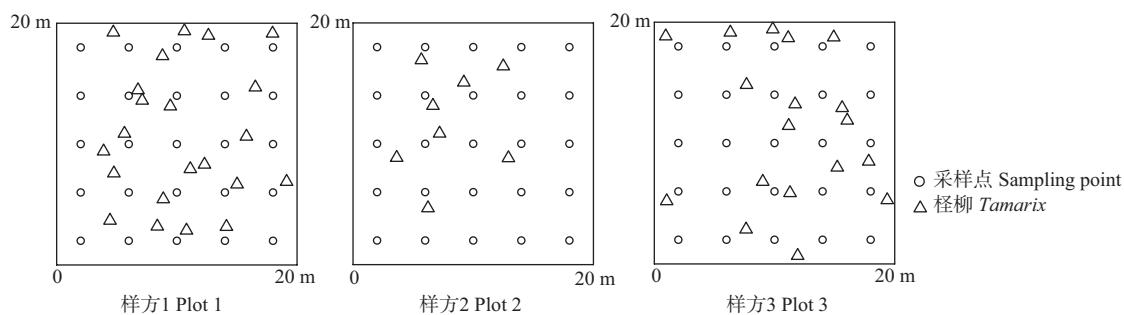


图1 样地内采样点与柽柳的分布。

Fig. 1 Distribution of the sampling points and *Tamarix* in quadrat.

异系数均随土层深度的增加而减小, 0-20 cm土壤盐分在水平方向上的变异最大。

## 2.2 土壤水盐的空间结构特征

利用地统计学法对土壤水盐数据进一步分析。由表6可知, 除样地3中0-20 cm土层含水量符合球状模型外, 其余各土层含水量具有相似的空间结构, 变异函数的最佳拟合模型均为高斯模型。块金系数 $[C_0/(C + C_0)]$ 反映了区域化变量的空间相关程度: 若 $C_0/(C + C_0) < 25\%$ , 变量具有强烈的空间相关性; 若在25%-5%之间, 变量具有中等的空间相关性; 若 $C_0/(C + C_0) > 75\%$ , 则空间相关性很弱<sup>[21]</sup>。0-40 cm土层含水量的块金系数大小为样地2>样地3>样地1, 即随着样地内柽柳密度的增大, 含水量的块金系数依次减小, 空间相关性增强。样地1和3内0-40 cm土层含水量的块金系数均小于25%, 具有强空间相关性, 说明空间差异主要由结构性因素(微地形、土壤特性、植被斑块格局等)引起。而样地2内0-40 cm土层含水量的块金系数在25%-75%之间, 具有中等空间相关性, 说明空间差异由结构性因素和随机因素共同决定。40-60 cm土层含水量在样地1和2内具有强空间相关性, 在样地3内具有中等强度的空间相关性。样地1和3内含水量的块金系数均表现出随土层深度增加而增大的趋势。各土层含水量的变程在6.51-39.08 m, 采样点平均间隔距离为4 m, 属于含水量的变程范围内, 说明进行空间内插是有效的。

由表7可知, 样地2的20-60 cm土层和样地3的0-20 cm土层电导率的半方差理论模型符合球状模型, 其余土层电导率的

变异函数最佳拟合模型均为高斯模型。各土层电导率半方差函数的决定系数( $R^2$ )均较高, 说明理论模型能很好地反映样地内土壤电导率的空间结构特征, 具有实际的应用意义。样地1和2内0-40 cm土层电导率均具有中等空间相关性, 而样地3内0-40 cm土层电导率的块金系数很小, 具有强空间相关性。40-60 cm土层电导率在样地2和3内具有强空间相关性, 在样地1内具有中等空间相关性。样地2和3内电导率的块金系数随土层深度的增加先增大后减小, 样地1内则相反。各土层电导率的变程在5.61-31.87 m, 其中样地3的变程在5.61-7.38 m, 差异很小, 说明各层土壤电导率的空间自相关变化尺度相同。

## 2.3 土壤水盐的空间分布格局

为了更直观地反映研究样地土壤水盐的分布特征, 在土壤水盐半变异函数理论和结构分析的基础上, 通过Surfer软件进行Kriging插值, 并绘制土壤水盐空间分布图。等值线的密集程度反映土壤水盐的空间变异性。由图2可以看出, 样地1和3内土壤含水量在水平方向上的变异程度随土层深度增加先减小后增大, 样地2内各土层含水量变异程度均较高。各样地不同土层含水量的空间分布模式比较一致, 低值与高值区域交错分布, 表现出一定的斑块状格局。结合柽柳的分布(图1)发现, 柽柳集中分布区域土壤含水量普遍较高。

从图3可以看出, 样地2和3土壤盐分在水平方向上的变异程度随土层深度的增加依次减小, 这与电导率变异系数的变化相同。对比各样地相应土层水盐空间分布模式可以看

表4 土壤含水量的统计特征值

Table 4 Statistics of the soil water content in each plot

样地 Plot	土层深度 Soil depth (δ/cm)	最小值 Minimum (w%)	最大值 Maximum (w%)	均值 Mean (w%)	标准差 Std	变异系数 (CV%)	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	分布类型 Distribution type
1	0-20	0.88	5.66	1.98 <sup>Bb</sup>	1.11	56.1	1.77	3.78	正态 Normal
	20-40	0.97	5.16	2.09 <sup>Bb</sup>	1.08	51.6	1.36	1.34	正态 Normal
	40-60	0.87	6.97	3.26 <sup>Aa</sup>	1.93	59.2	0.65	-0.79	正态 Normal
	0-20	1.89	9.65	5.68 <sup>Aab</sup>	2.83	49.8	0.12	-1.61	正态 Normal
2	20-40	0.91	12.21	4.75 <sup>Ab</sup>	3.97	83.7	0.84	-0.89	正态 Normal
	40-60	1.42	15.34	7.55 <sup>Aa</sup>	3.61	47.8	0.48	0.02	正态 Normal
	0-20	0.97	7.98	3.05 <sup>Bab</sup>	1.95	63.9	0.83	-0.18	正态 Normal
3	20-40	0.89	5.93	2.11 <sup>Bb</sup>	1.13	53.5	1.75	4.37	正态 Normal
	40-60	1.07	7.30	3.08 <sup>Ba</sup>	1.94	62.9	1.19	0.26	正态 Normal

不同大写字母表示不同样地的同一土层间差异显著( $P < 0.05$ ), 不同小写字母表示同一样地内不同土层间差异显著( $P < 0.05$ )。

Different capital letters indicate significant difference between different plots in same depth ( $P < 0.05$ ); different lowercase letters indicate significant difference between different depths at same plot ( $P < 0.05$ ).

表5 土壤电导率的统计特征值

Table 5 Statistics of the soil electrical conductivity

样地 Plot	土层深度 Soil depth (δ/cm)	最小值 Minimum (EC/mS cm <sup>-1</sup> )	最大值 Maximum (EC/mS cm <sup>-1</sup> )	均值 Mean (EC/mS cm <sup>-1</sup> )	标准差 Std	变异系数 (CV%)	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	分布类型 Distribution type
1	0-20	2.91	22.40	10.50 <sup>Bb</sup>	6.34	60.4	0.61	-1.01	正态 Normal
	20-40	2.13	31.20	13.27 <sup>Bb</sup>	7.98	60.1	0.66	-0.42	正态 Normal
	40-60	3.52	40.90	18.72 <sup>Aa</sup>	10.03	53.6	0.41	-0.28	正态 Normal
	0-20	4.88	52.60	25.38 <sup>Aa</sup>	15.85	62.4	0.38	-1.28	正态 Normal
2	20-40	6.12	52.10	22.67 <sup>Aa</sup>	12.04	53.1	0.81	0.06	正态 Normal
	40-60	8.58	44.30	22.63 <sup>Aa</sup>	8.17	36.1	0.42	0.58	正态 Normal
	0-20	1.56	32.50	13.11 <sup>Ba</sup>	9.84	75.0	0.85	-0.71	正态 Normal
3	20-40	4.01	30.90	11.11 <sup>Ba</sup>	7.25	65.3	1.53	1.72	正态 Normal
	40-60	3.79	25.10	10.28 <sup>Ba</sup>	4.93	48.0	1.19	2.02	正态 Normal

不同大写字母表示不同样地的同一土层间差异显著( $P < 0.05$ ), 不同小写字母表示同一样地内不同土层间差异显著( $P < 0.05$ )。

Different capital letters indicate significant difference between different plots in same depth ( $P < 0.05$ ); different lowercase letters indicate significant difference between different depths at same plot ( $P < 0.05$ ).

表6 土壤含水量的半方差函数模型及其参数

Table 6 Parameters of semi-variance model for the soil water content

样地 Plot	土层深度 Soil depth (δ/cm)	理论模型 Model	块金值 Nugget ( $C_0$ )	基台值 Sill ( $C + C_0$ )	块金系数 Nug/Sill ( $(C_0/(C + C_0))\%$ )	变程 Range (s/m)	决定系数 Coefficient of determination ( $R^2$ )
1	0-20	高斯模型 Gaussian	0.001	1.301	0.08	6.51	0.695
	20-40	高斯模型 Gaussian	0.001	1.092	0.09	7.00	0.820
	40-60	高斯模型 Gaussian	0.890	4.633	19.21	10.63	1.000
2	0-20	高斯模型 Gaussian	3.100	8.614	35.99	11.74	1.000
	20-40	高斯模型 Gaussian	8.470	16.980	49.88	14.62	1.000
	40-60	高斯模型 Gaussian	0.010	14.100	0.07	7.66	0.766
3	0-20	球状模型 Spherical	0.250	3.738	6.69	6.89	0.953
	20-40	高斯模型 Gaussian	0.851	3.712	22.93	39.08	0.861
	40-60	高斯模型 Gaussian	2.710	8.203	33.04	35.46	0.978

表7 土壤电导率半方差函数模型及其参数

Table 7 Parameters of semi-variance model for the soil electrical conductivity

样地 Plot	土层深度 Soil depth (δ/cm)	理论模型 Model	块金值 Nugget ( $C_0$ )	基台值 Sill ( $C + C_0$ )	块金系数 Nug/Sill ( $(C_0/(C + C_0))\%$ )	变程 Range (s/m)	决定系数 Coefficient of determination ( $R^2$ )
1	0-20	高斯模型 Gaussian	27.57	55.29	49.86	25.63	1.000
	20-40	高斯模型 Gaussian	41.80	115.72	36.12	31.87	0.998
	40-60	高斯模型 Gaussian	62.50	132.10	47.31	20.82	1.000
2	0-20	高斯模型 Gaussian	124.80	401.20	31.11	24.32	1.000
	20-40	球状模型 Spherical	49.80	140.10	35.55	13.50	1.000
	40-60	球状模型 Spherical	6.10	70.74	8.62	5.63	0.820
3	0-20	球状模型 Spherical	0.10	93.34	0.11	7.38	0.969
	20-40	高斯模型 Gaussian	0.10	56.35	0.18	5.61	0.999
	40-60	高斯模型 Gaussian	0.01	26.69	0.04	6.72	1.000

出, 土壤含水量的高值中心大致对应盐分的高值区域, 而含水量的低值中心也与盐分的低值区域大致对应, 在一定程度上反映出土壤水盐之间的耦合作用关系。柽柳集中分布区域土壤盐分含量普遍较高, 尤其在0-20 cm表层最为明显。

## 2.4 土壤水盐与植被相关性

如表8所示, Pearson相关性检验表明, 样地土壤含水量与电导率之间均呈正相关关系, 表明土壤水盐变化趋势相对一致, 这与钠质盐土 $\text{Na}^+$ 含量高, 土壤不通透, 土壤水分因运动不畅导致积聚的结构特性有关。样地1和2的0-20 cm土层土壤含水量和电导率的相关性不显著, 相关系数分别为0.113和0.357, 这可能与表层土壤受到草本植被和人为活动等因素影响较大有关。而样地3的0-20 cm土层土壤含水量和电导率极显著相关( $P < 0.01$ )。3个样地20-40 cm土层土壤水盐均为极显著相关( $P < 0.01$ )。40-60 cm土层仅样地2内土壤水盐无显著相关性。

表8 土壤水盐的相关性分析

Table 8 The correlation coefficient between soil water content and EC<sub>e</sub>

样地 Plot	土层深度 Soil depth (δ/cm)		
	0-20	20-40	40-60
1	0.113NS	0.553**	0.718**
2	0.357NS	0.606**	0.313NS
3	0.667**	0.739**	0.503*

表中数据为Pearson相关系数。\*\* $P < 0.01$ , \* $P < 0.05$ , NS不显著。

The data in the table is Pearson correlation coefficients. \*\* $P < 0.01$ ; \* $P < 0.05$ ; NS indicates no significant difference.

表9为土壤水盐与柽柳生长状况间的响应关系, 可以看出, 0-40 cm土层含水量与柽柳生长指标在样地1和2内呈正相关关系, 40-60 cm土层含水量与柽柳生长指标在样地2内呈正相关关系, 而在样地1和3内呈现出一定的负相关关系。样

地2和3内土壤电导率与柽柳生长指标间呈正相关关系, 且样地2的相关性大于样地3, 表明土壤盐分受到柽柳生长的影响, 柽柳株高、地径越大, 其聚盐效果越显著。而样地1内土壤电导率与柽柳生长指标间呈负相关关系, 相关性均未达到显著水平。

## 3 讨论

### 3.1 柽柳群落土壤水盐空间分布特征

本研究采用样地调查法, 结合经典统计学与地统计学方法, 分析了黄河上游半干旱盐渍区柽柳群落的土壤水盐空间分布特征及其响应关系。结果表明, 柽柳群落样地土壤水盐具有明显的空间变异性。经典统计学分析显示, 样地土壤水盐均表现为中等变异性, 但二者的变化规律不一致。样地土壤含水量普遍较低, 均值处于1.98%-7.55%之间。土壤干旱时, 土壤水分状况主要由土壤的物理特性和植被等因素控制<sup>[22]</sup>。样地1和3土壤含水量的变异系数随土层深度的增加先减小后增大, 这是因为表层土壤较深层蒸发更强烈, 且与植被的分布、覆盖有关, 加之样地1和3内柽柳分布较多, 其通过发达的根系对深层土壤水分的利用较大, 进而导致深层土壤水分变异系数增大<sup>[23]</sup>。样地2内则为20-40 cm土层含水量变异系数最大, 这与植物的根系分布有关: 样地2内柽柳灌丛最少, 更多受到以碱蓬为主的草本植物根系吸水的影响, 而草本植物根系主要分布于20-40 cm亚表层, 故该层土壤水分相比其他土层具有更大变异程度。同时, 研究样地土壤盐渍化程度高, 土壤电导率均值在10 mS/cm以上。样地1中土壤电导率随土层深度的增加而增加, 样地2和3中土壤电导率随土层深度的增加而递减。这是由于样地1中柽柳密度最大且草本覆盖度较高(表1、表2), 遮阴效果较好, 有效缓解了地

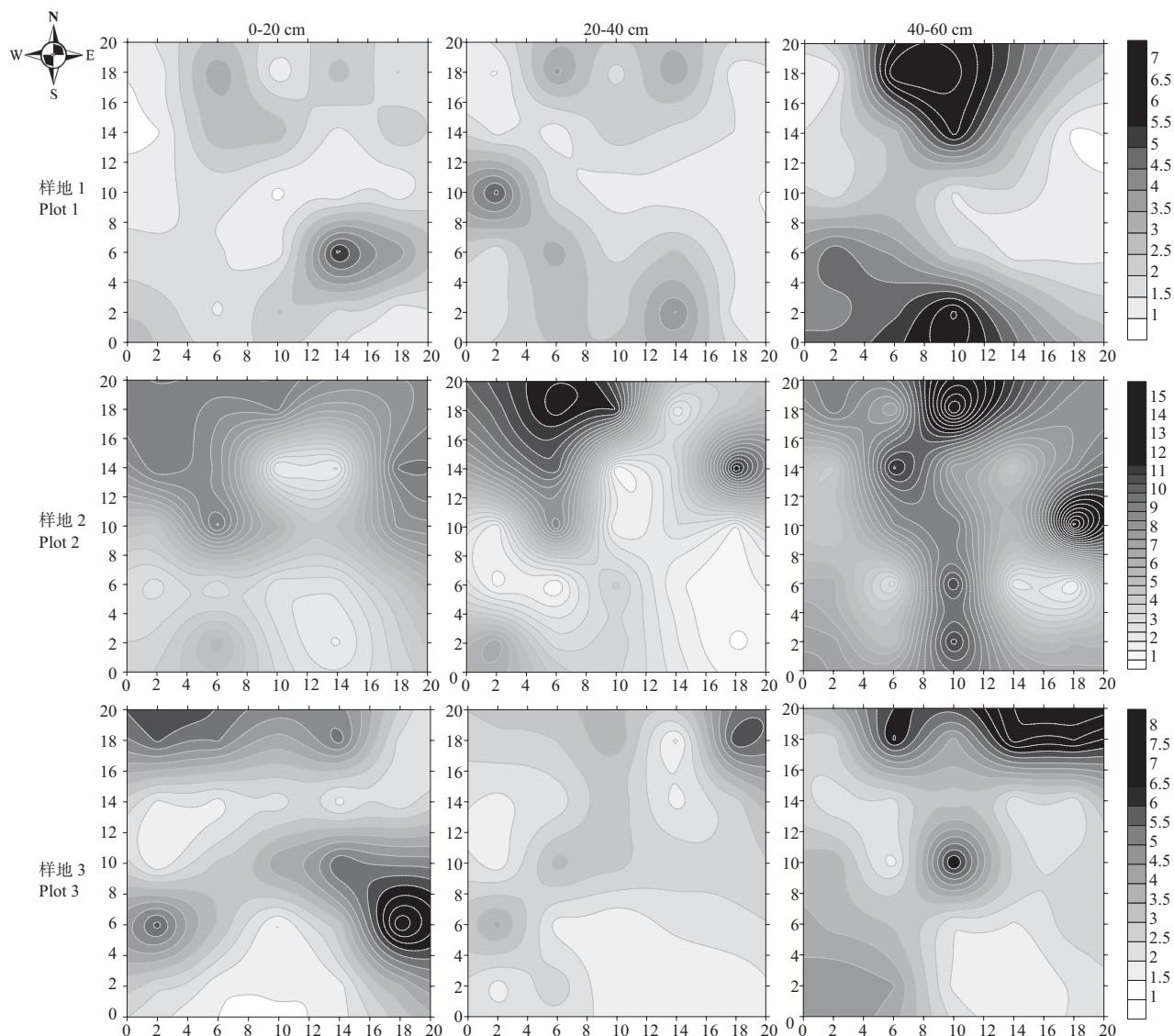


图2 各样地土壤含水量的空间分布。

Fig. 2 Distribution maps of soil water content in each quadrat.

表9 土壤水盐与柽柳生长指标的相关性

Table 9 The correlation coefficient of soil water content, EC<sub>e</sub>, and growth index of *Tamarix*

样地 Plot	指标 Index	含水量 Soil water content			电导率 EC <sub>e</sub>		
		0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm
1	株高 Height	0.264	0.101	0.041	-0.262	-0.189	-0.116
	地径 Ground diameter	0.433*	0.269	-0.020	-0.202	-0.187	-0.058
	冠幅 Crown	0.274	0.244	-0.066	-0.235	-0.188	-0.002
2	株高 Height	0.674*	0.751*	0.297	0.747*	0.524*	0.764*
	地径 Ground diameter	0.446*	0.590*	0.250	0.559*	0.257	0.562*
	冠幅 Crown	0.557*	0.717*	0.208	0.703*	0.454	0.685*
3	株高 Height	0.207	0.178	-0.355	0.424	0.235	0.070
	地径 Ground diameter	0.080	0.269	-0.304	0.375	0.477*	0.147
	冠幅 Crown	-0.048	0.173	-0.190	0.139	0.230	-0.046

表中数据为Pearson相关系数。\*P &lt; 0.05。

The data in the table is Pearson correlation coefficients. \*P &lt; 0.05.

表蒸发聚盐。样地2内虽然草本盖度最高，但由于柽柳分布最少，遮阴效果不如样地1好；而样地3内草本覆盖度较低，故两个样地内地表蒸发强烈，盐分呈现明显的表聚特征。各样地土壤电导率的变异系数均随土层深度增加而递减，表明

0-20 cm表层土壤盐分在水平方向上的变异最大，这与柽柳的盐岛效应主要作用与表层土壤有关<sup>[24]</sup>。

地统计学分析发现，各样地土壤水盐在研究变程内均具有明显的空间结构特征，可用不同的模型对其进行拟合。样

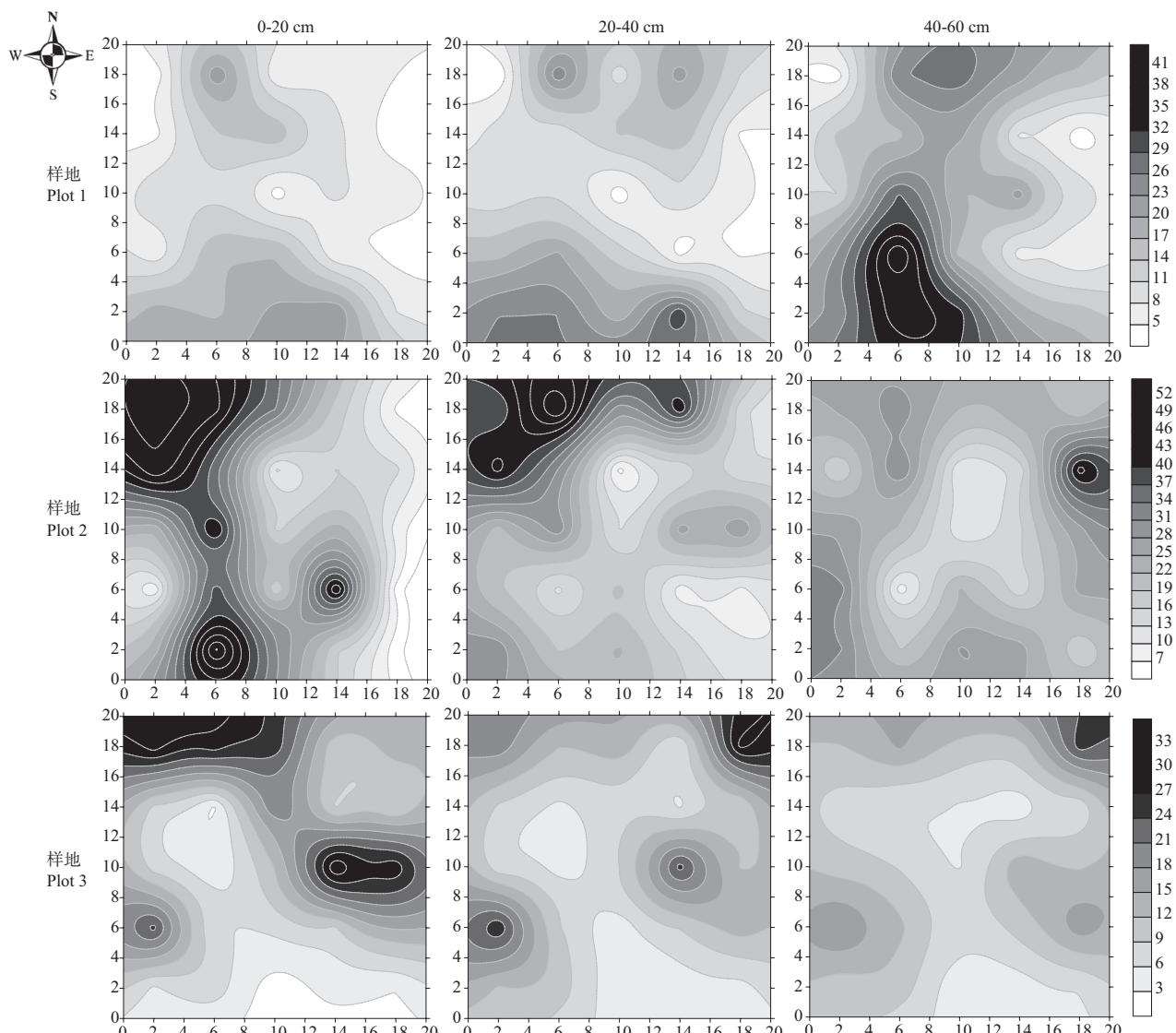


图3 各样地土壤电导率的空间分布。

Fig. 3 Distribution maps of  $EC_e$  in each quadrat.

地土壤水盐均符合高斯模型；样地2土壤水分符合高斯模型，0-20 cm土层盐分符合高斯模型而20-60 cm土层盐分符合球状模型；样地3的0-20 cm土层水盐符合球状模型，而20-60 cm土层水盐符合高斯模型。各样地土壤水盐均具有较强的空间自相关性，主要受到微地形、土壤特性、植被斑块格局等结构性因素影响<sup>[25]</sup>或结构性因素与随机因素（人为活动等）的共同影响。0-40 cm土层含水量的空间相关性随着样地内柽柳密度的增大而增强，说明植被对随机因素的影响有一定的抵抗作用<sup>[26]</sup>。不同土层土壤水盐的块金系数差异较大可能是由研究样地内微地形起伏和土壤状况差异引起。由Kriging插值获得的土壤水盐空间分布格局显示，柽柳群落样地内土壤水分和盐分的空间分布呈现斑块状格局，土壤水盐高低值区域大致对应。这与微地形、土壤特性等因素有关：柽柳群落样地土壤为钠质盐土，土壤通透性差，盐分含量越高，土壤越不通透，水分因在土壤中运动不畅而积聚<sup>[27]</sup>。此外样地内植被斑块格局对土壤水盐分布亦有影响：柽柳集中

分布区域土壤水盐含量普遍较高，尤其在0-20 cm表层土壤盐分高值区域与柽柳的分布最为一致。已有研究表明，柽柳能通过生物积盐作用、树干径流、非生物环境作用等过程引起土壤盐分在植株周围富集并在其冠下形成“盐岛”，且表层土壤中盐岛效应最为显著<sup>[2-4]</sup>，从而导致样地内土壤盐分围绕柽柳形成斑块状分布。由于不同样地内柽柳的分布、密度、长势均不相同，个体生长对土壤水分的消耗、对盐分的富集以及对小气候环境的影响不一，使得土壤水盐的空间分布格局趋于复杂化。由此可见，微地形、土壤特性、植被斑块格局等结构性因素是引起柽柳群落样地土壤水盐空间变异的主要因素。

### 3.2 土壤水盐与植被相关性

植物与土壤间的相互作用是影响生态系统过程的重要因素。相关性检验表明，柽柳群落样地土壤水盐之间呈正相关关系，但各样地内的显著性不尽相同，说明不同植被状况对土壤水分和盐分间相关关系的影响较大。样地土壤含水量

与柽柳生长指标间大体呈正相关关系,水分对植被的生长至关重要,土壤含水量最高的样地2内柽柳株高、地径、冠幅最大,长势最好;植被能够改善地表微环境,柽柳长势越好,其截留和持蓄降雨的能力越强、遮阴效果越好,反过来又能增加土壤含水量,故两者之间存在一定的相关性。样地1和3内40-60 cm土层含水量与柽柳生长指标间呈现出负相关关系,这与两个样地内柽柳大量分布,其根系吸收消耗深层土壤水分较多有关。样地2和3内土壤盐分与柽柳生长指标间呈正相关关系,且样地2的相关性大于样地3,表明土壤盐分受到柽柳生长的影响,且柽柳长势越好对土壤盐分的影响越大。柽柳是一种典型的泌盐植物<sup>[28]</sup>,其根系能选择吸收盐分,运输到枝叶,最后以凋落物的形式排出体外,使盐分回到表层土壤中<sup>[29]</sup>。且柽柳植株低矮,株型紧凑,可有效积累并保护冠下的凋落物不受损失<sup>[30]</sup>,盐分能以最大程度返还表层土壤。Stromberg的研究<sup>[31]</sup>表明,美国西部干旱地区柽柳群落土壤盐分含量随树龄增大而增加,这与本研究中柽柳树高、地径最大的样地2内土壤盐分含量显著高于样地1和3的结论类似。样地1内土壤盐分与柽柳生长指标间呈负相关关系,但未达到显著水平,这可能与样地1内土壤水分含量较低有关。研究区所处的地理、气候、水文等自然条件决定了土壤水盐空间分布的内在基础,而柽柳的生长与分布则增强了土壤水盐的空间变异性。柽柳群落与土壤水盐之间存在明显相关性,其相互作用是影响区域植被恢复与配置的重要因素。

## 4 结论

通过样地调查法对黄河上游半干旱盐渍区天然柽柳群落样地土壤水盐分布进行研究发现,柽柳群落样地土壤水分含量普遍较低(1.98%-7.55%),土壤水分在水平方向上的变异均属于中等程度变异;土壤盐渍化程度高(平均电导率10.28-25.38 mS/cm),土壤盐分变异系数随土层深度增加而减小,均属于中等程度变异。样地土壤水盐均具有明显的空间结构特征,可用相应模型对其进行拟合。样地中土壤水盐主要受到微地形、土壤特性、植被斑块格局等结构性因素影响或结构性因素与随机因素(人为活动等)的共同影响,空间相关性较强。Kriging插值结果表明,柽柳群落样地土壤水分和盐分空间分布呈斑块状格局,土壤水盐高低值区域大致对应。柽柳集中分布区域土壤水盐含量普遍较高,在0-20 cm表层土壤盐分空间分布格局中尤为明显。受柽柳生长与分布的影响,土壤水盐之间的耦合作用关系更趋复杂多变,但各土层水分与盐分间均具有正相关关系。柽柳的群落分布与生长状况增强了土壤水盐的空间变异性,而土壤水盐的分布进一步影响了整个柽柳群落以及群落中其他植被的分布。本研究结果可为黄河上游半干旱盐渍区植被恢复建设与配置过程提供一定的参考。建议该区域进行柽柳造林过程中与耐盐耐旱植物种搭配,同时避免柽柳冠内种植。

## 参考文献 [References]

- 1 尹林克. 中亚荒漠生态系统中的关键种——柽柳 (*Tamarix* spp.) [J]. 干旱区研究, 1995, 12 (3): 43-47 [Yin LK. *Tamarix* spp. — the keystone species of desert ecosystem [J]. *Arid Zone Res*, 1995, 12 (3): 43-47]
- 2 Yin CH, Feng G, Zhang FS, Tian CY, Tang CX. Enrichment of soil fertility and salinity by tamarisk in saline soils on the northern edge of the Taklamakan Desert [J]. *Agric Water Manage*, 2010, 97: 1978-1986
- 3 Ohrtman MK, Sher AA, Lair KD. Quantifying soil salinity in areas invaded by *Tamarix* spp. [J]. *J Arid Environ*, 2012, 85: 114-121
- 4 张立华, 陈小兵. 盐碱地柽柳“盐岛”和“肥岛”效应及其碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 应用生态学报, 2015, 26 (3): 653-658 [Zhang LH, Chen XB. Characteristics of ‘salt island’ and ‘fertile island’ for *Tamarix chinensis* and soil carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometry in saline-alkali land [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2015, 26 (3): 653-658]
- 5 Xia JB, Zhang SY, Zhao XM, Liu JH, Chen YP. Effects of different groundwater depths on the distribution characteristics of soil-*Tamarix* water contents and salinity under saline mineralization conditions [J]. *Catena*, 2016, 142: 166-176
- 6 关洪斌, 王晓兰, 鞠迪. 柽柳对滨海盐渍土的改良作用及其应用[J]. 资源开发与市场, 2009, 25 (10): 918-921 [Guan HB, Wang XL, Ju D. Soiled modification and application of *Tamarix chinensis* on the saline soil [J]. *Res Develop Market*, 2009, 25 (10): 918-921]
- 7 封晓辉, 张秀梅, 刘小京, 程瑞梅, 孙焕荣. 滨海重盐碱地人工栽植柽柳生长动态及生态效应[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21 (10): 1233-1240 [Feng XH, Zhang XM, Liu XJ, Cheng RM, Sun HR. Growth dynamics of *Tamarix chinensis* plantations in heavy-saline coastal lands and related ecological effects [J]. *Chin J Ecol Agric*, 2013, 21 (10): 1233-1240]
- 8 邱开阳, 谢应忠, 许冬梅, 时项锋, 齐拓野, 刘丽丹, 王东清. 毛乌素沙地南缘沙漠化临界区域土壤水分和植被空间格局[J]. 生态学报, 2011, 31 (10): 2697-2707 [Qiu KY, Xie YZ, Xu DM, Shi XF, Qi TY, Liu LD, Wang DQ. Spatial patterns of soil moisture and vegetation attributes along the critical area of desertification in southern Mu Us Sandy Land [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, 31 (10): 2697-2707]
- 9 史丽丽, 赵成章, 樊洁平, 张静, 张军霞. 祁连山地甘肃臭草斑块土壤水分与植被盖度空间格局[J]. 生态学杂志, 2013, 32 (2): 285-291 [Shi LL, Zhao CZ, Fan JP, Zhang J, Zhang JX. Spatial patterns of soil moisture and vegetation coverage in *Melica przewalskyi* patches in degraded alpine grassland of Qilian Mountains, Northwest China [J]. *Chin J Ecol*, 2013, 32 (2): 285-291]
- 10 何斌, 蔡永立, 冉雯瑞, 赵小雷. 人工植被对崇明东滩滨海盐土水盐空间异质性的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24 (8): 2151-2158 [He B, Cai YL, Ran WR, Zhao XL. Effects of artificial vegetation on the spatial heterogeneity of soil moisture and salt in coastal saline land of Chongming Dongtan, Shanghai [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2013, 24 (8): 2151-2158]
- 11 赵振勇, 王让会, 尹传华, 王雷. 天山南麓山前平原土壤盐分空间异质性对植物群落组成及结构的影响[J]. 干旱区地理, 2007, 30 (6): 839-845 [Zhao ZY, Wang RH, Yin CC, Wang L. Influence of spatial heterogeneity of soil salinity on plant community structure and composition of plain at south piedmont of Tianshan Mountains [J]. *Arid Land Geogr*, 2007, 30 (6): 839-845]
- 12 He B, Cai YL, Ran WR, Zhao XL, Jiang H. Spatiotemporal heterogeneity of soil salinity after the establishment of vegetation on a coastal saline field [J]. *Catena*, 2015, 127: 129-134
- 13 戚志伟, 高艳娜, 樊同, 李沙沙, 王开运, 仲启铖, 张超. 崇明东滩围垦湿地芦苇生态特征与水盐因子的关系[J]. 应用与环境生物学报, 2016, 22 (5): 739-746 [Qi ZW, Gao YN, Fan T, Li SS, Wang KY,

- Zhong QC, Zhang C. Relationship between ecological characteristics of *Phragmites australis* and water-salt indicators in the reclaimed wetland at Dongtan of Chongming Island, China [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2016, **22** (5): 739-746]
- 14 尹传华, 冯固, 田长彦, 白灯莎, 张福锁. 塔克拉玛干沙漠边缘柽柳对土壤水盐分布的影响[J]. 中国环境科学, 2007, **27** (5): 670-675 [Yin CH, Feng G, Tian CY, Bai DS, Zhang FS. Influence of tamarisk shrub on the distribution of soil salinity and moisture on the edge of Taklamakan desert [J]. *Chin Environ Sci*, 2007, **27** (5): 670-675]
- 15 Liu JT, Rong QQ, Zhao YY. Variations in soil nutrients and salinity caused by tamarisk in the coastal wetland of the Laizhou Bay, China [J]. *Ecosphere*, 2017, **8** (2): e01672.10.1002/ecs2.1672
- 16 张立华, 陈沛海, 李健, 陈小兵, 冯亚. 黄河三角洲柽柳植株周围土壤盐分离子的分布[J]. 生态学报, 2016, **36** (18): 5741-5749 [Zhang LH, Chen PH, Li J, Chen XB, Feng Y. Distribution of soil salt ions around *Tamarix chinensis* individuals in the Yellow River Delta [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, **36** (18): 5741-5749]
- 17 李小龙. 青铜峡灌区水盐动态研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2003 [Li XL. Movement of soil salts in Qingtongxia Irrigation Area [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2003]
- 18 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 130-136 [Wang ZQ, Zhu SQ, Yu RP. Saline Soil in China [M]. Beijing: Science Press, 1993: 130-136]
- 19 Richards LA. Diagnoses and Improvement of Saline and Alkali Soils. Agriculture Handbook No. 60 [M]. Riverside: United States Salinity Laboratory, 1954: 83-126
- 20 Nielsen DR, Bouma J. Soil Spatial Variability [M]. Wageningen: PUDOC, 1985: 2-30
- 21 Cambardella CA, Moorman TB, Novak JM, Parkin TB, Karlen DL, Turco RF, Konopka AEE. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1994, **58** (5): 1501-1511
- 22 Grayson RB, Western AW, Chiew FHS, Bloeschl G. Preferred states in spatial soil moisture patterns: local and nonlocal controls [J]. *Water Res*, 1997, **33** (12): 2897-2908
- 23 孙飞达, 陈文业, 袁海峰, 窦英杰, 邵丹珲, 冯颖, 吴婷. 甘肃敦煌西湖荒漠-湿地生态系统土壤水分空间异质性及其影响因子研究[J]. 西北植物学报, 2016, **36** (1): 165-173 [Sun FD, Chen WY, Yuan HF, Dou YJ, Bin DH, Feng Y, Wu T. Spatial heterogeneity of soil moisture and related factors in desert-wetland ecosystem enclosed in Dunhuang Xihu, Gansu, China [J]. *Acta Bot Bor-Occid Sin*, 2016, **36** (1): 165-173]
- 24 Ladenburger CG, Hild AL, Kazmer DJ, Munn LC. Soil salinity patterns in *Tamarix* invasions in the Bighorn Basin, Wyoming, UAS [J]. *J Arid Environ*, 2006, **65**: 111-128
- 25 苏松锦, 刘金福, 陈文伟, 旷开金, 唐蓉, 洪伟. 戴云山黄山松林土壤水分物理性质空间变异特征与格局[J]. 资源科学, 2014, **36** (11): 2423-2430 [Su SJ, Liu JF, Chen WW, Kuang KJ, Tang R, Hong W. Spatial variability and patterns of soil moisture physical properties in *Pinus taiwanensis* forest based on geostatistics and GIS [J]. *Res Sci*, 2014, **36** (11): 2423-2430]
- 26 李宝富, 熊黑钢, 张建兵, 龙桃. 两种植被覆盖度下土壤水分和盐分的空间变异性研究[J]. 新疆农业科学, 2010, **47** (1): 168-173 [Li BF, Xiong HG, Zhang JB, Long T. Study on spatial variability of soil water and salt under the two vegetation coverages [J]. *Xinjiang Agric Sci*, 2010, **47** (1): 168-173]
- 27 李小刚, 曹靖, 李凤民. 盐化及钠质化对土壤物理性质的影响[J]. 土壤通报, 2004, **35** (1): 64-72 [Li XG, Cao J, Li FM. Influence of salinity, sodicity and organic matter on some physical properties of salt-affected soils [J]. *Chin J Soil Sci*, 2004, **35** (1): 64-72]
- 28 Sookbir Singh R, Castillo K, Gill TE, Chianelli RR. Salt Separation Processes in the Saltcedar *Tamarix ramosissima* (Ledeb.) [J]. *Commun Soil Sci Plan*, 2010, **41**: 1271-1281
- 29 Arndt SK, Arampatsis C, Foetzki A, Li XY, Zeng FG, Zhang XM. Contrasting patterns of leaf solute accumulation and salt adaptation in four phreatophytic desert plants in a hyperarid desert with saline groundwater [J]. *J Arid Environ*, 2004, **59**: 259-270
- 30 Bochet EJ, Rubio L, Poesen J. Modified topsoil islands within patchy Mediterranean vegetation in SE Spain [J]. *Catena*, 1999, **38** (1): 23-44
- 31 Stromberg JC. Functional equivalency of saltcedar (*Tamarix chinensis*) and fremont cottonwood (*Populus fremontii*) along a free-flowing river [J]. *Wetlands*, 1998, **18** (4): 675-686