

DOI: 10.11766/trxb202101110601

杨洪涛, 王志春, 杨帆, 安丰华, 张璐. 松嫩平原盐碱化人工草地土壤与植被群落空间变异特征研究[J]. 土壤学报, 2022, 59 (4): 1025–1035.

YANG Hongtao, WANG Zhichun, YANG Fan, AN Fenghua, ZHANG Lu. The Spatial Variations of Saline-alkali Artificial Grassland on the Songnen Plain[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59 (4): 1025–1035.

松嫩平原盐碱化人工草地土壤与植被群落空间变异特征研究*

杨洪涛^{1, 2}, 王志春², 杨帆², 安丰华^{2, 3}, 张璐^{2, 3}

(1. 宜春学院生命科学与资源环境学院, 江西宜春 336000; 2. 中国科学院东北地理与农业生态研究所 黑土区农业生态重点实验室, 长春 130102; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 松嫩草地由于受太平洋季风气候的影响, 具有较好的水热条件, 且地势平坦, 非常适宜畜牧业的机械化发展。在过去的几十年间, 松嫩草地物种丰富度较高, 优质的牧草以多年生的羊草为主, 且在植被下形成了肥力较高的黑土。然而, 松嫩草地独特的地形与高矿化度的地下水, 导致了盐渍土与黑土接壤, 因此松嫩草地生态环境较为脆弱。此外, 由于草地的过度利用, 导致了松嫩草地发生退化与盐碱化, 进而使得草地生产力降低。较低的草地生产力已成为限制该区域畜牧业发展的主要因素, 而草地生产力与土壤水盐动态密切相关。故本研究以松嫩盐碱化人工草地为研究对象, 采用经典统计学与地统计学相结合的方法, 对松嫩平原西部地区的盐碱化人工草地土壤理化性质以及牧草生物学-生态学性质的空间变异特征进行研究。结果表明, 0~15 cm 和 15~30 cm 层土壤的 pH、电导率 (EC)、总碱度 (TA), 以及土壤质量含水量 (MWC) 具有中度或强空间变异。此外, 试验区域的生物多样性指数 (SWI)、紫花苜蓿的株高 (SH)、生物量干重 (DM) 与盖度 (CD) 均具有强烈的空间变异特征。回归分析结果表明, 试验区域盐碱化人工草地紫花苜蓿产量可用公式 $Y(DM) = 2699.73 - 276.496 \text{ pH}$ ($7.17 < \text{pH} < 9.76$) 预估。本研究结果可为苏打盐渍土的精细化管理与利用提供理论基础与数据支持。

关键词: 盐碱化人工草地; 土壤理化性质; 紫花苜蓿; 空间变异

中图分类号: S153.6+1 **文献标志码:** A

The Spatial Variations of Saline-alkali Artificial Grassland on the Songnen Plain

YANG Hongtao^{1, 2}, WANG Zhichun², YANG Fan², AN Fenghua^{2, 3}, ZHANG Lu^{2, 3}

(1. College of Life Science and Resource and Environment, Yichun University, Yichun, Jiangxi 336000, China; 2. Key Laboratory of Mollisols Agroecology, Northeast Institute of Geography and Agroecology, CAS, Changchun 130102, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: 【Objective】 Grasslands in Songnen plain are propitious to the develop the mechanized-graziery due to its flat terrain and the climatic conditions, which influences by temperate continental monsoon climate. Moreover, influenced by the high plant

* 国家重点研发计划项目 (2016YFC0501200) 和国家自然科学基金项目 (41571210, 41771250, 41701335) 共同资助 Supported by the National Key R&D Program of China (No. 2016YFC0501200) and National Natural Science Foundation of China (Nos. 41571210, 41771250, 41701335)

作者简介: 杨洪涛 (1989—), 男, 黑龙江绥化人, 博士, 主要从事苏打盐渍土理化性质的相关研究。E-mail: yang_ht_ucas@126.com

收稿日期: 2021-01-11; 收到修改稿日期: 2021-08-12; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2022-01-24

coverage and diversity, black soil was developed, and the high quality forage species was dominated by *Leymus chinensis* in the past decades. However, the fragile eco-environment of Songnen grasslands could be impacted by the special topography, high salinity and shallow groundwater, and the parent material. Soil parameters are typically used to quantify the relationship between soil properties and forage yield and to identify the limiting factors of grassland productivity. Because of overgrazing and overdevelopment, the Songnen grasslands were degraded and salinized significantly. The husbandry was remarkable hindered by the low grassland productivity. The objectives of this study were: 1) to investigate the spatial variation characteristics of soil physical and chemical properties; 2) to estimate the spatial variation characteristics of vegetation community; 3) to explore the potential linkages between dry yield of alfalfa and soil physical and chemical properties. 【Method】 The artificial grassland locates at the Xinfawopeng village of Baicheng City, which covers an area of 600 m×450 m. The soil sample points were set by grid method, with the spacing of each neighbor sample points was 50 m. The soil samples were collected from alfalfa artificial grassland from by cutting rings and soil auger in October 2017 and May 2018 for detecting the soil physico-chemical properties, meanwhile, the forage samples were collected in a quadrat of 1 m² (1 m×1 m). All the soil samples were air-dried, ground and then passed through a 2-mm sieve for chemical properties. The 1 : 5 of soil-water extracts were used to determining soil pH, EC, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, HCO₃⁻, and CO₃²⁻. The spatial variations of soil properties, including soil mass water content (MWC), soil pH, EC, and total alkalinity (TA) were determined by classical statistics and geostatistics. Furthermore, the spatial variations of biological characteristics of artificial grassland, such as the Shannon-Wiener Index (SWI), dry yield (DY), shoot height (SH), and cover degree (CD) in the study area, were analyzed with classical statistics and geostatistics. 【Result】 At the depth of 0~30 cm, very high spatial variability of the EC and TA were found, however, the pH and MWC showed moderate spatial variations; The biological properties of the grassland community showed high spatial variations. Results of multiple linear regression (MLR-step wise) suggested that the alfalfa dry biomass (DM) could be predicted by (DM) = 2 699.73-276.496 pH (7.17< pH <9.76), which indicated that the soil pH influenced the alfalfa yield more than other soil properties. 【Conclusion】 The above results indicated that the soil physico-chemical properties of artificial grasslands in western Songnen pain were high and moderate spatial variations, and the alfalfa could not tolerance the pH higher than 9.76.

Key words: Saline-alkaline artificial grassland; Soil physico-chemical properties; Alfalfa; Spatial variation

松嫩平原 (48°30'—48°5'N, 122°12'—126°20'E) 三面环山, 南面为平缓的松辽分水岭, 中部为发育程度高的苏打盐渍土^[1]。土壤盐渍化导致生态环境恶化, 土地综合生产能力降低, 成为制约该区域农牧业发展的关键因素。虽然, 自 20 世纪 90 年代开始, 有关方面采取了一系列的盐碱化土壤改良与治理措施并取得了一定的成效, 但目前松嫩平原土壤盐渍化发展的速度和面积大于改良与治理的速度与面积^[2]。

土壤盐碱化可严重制约土地资源的可持续性利用与生态系统的稳定性^[3], 而盐碱化土壤的改良与利用一直是土壤科学一个非常重要的研究内容。随着精准农业思想的提出, 许多学者对土壤空间变异特征进行了研究^[4-7]。松嫩平原苏打盐渍土改良与利用的难点之一在于土壤理化性质的空间变异特征, 即所谓“一步三换土”。较强的土壤空间变异特征影响了灌溉与施肥的效率, 限制了农业生产的发展。对盐碱化土壤空间变异特征进行研究, 有利于农田

的精准化管理, 节约成本、增加效益。

关于松嫩平原苏打盐渍化水田土壤空间变异的结果表明, 盐碱化水田的土壤 pH 和 EC 呈强空间变异性, 而盐碱化旱田的表现土壤电导率具有中等空间变异^[8], 盐碱化芦苇人工草地土壤盐离子具有较明显的空间变异^[9]; 而关于盐碱化紫花苜蓿人工草地土壤空间变异特征的研究却鲜见报道。因此, 本研究对盐渍化紫花苜蓿人工草地的土壤理化性质的空间变异特征、紫花苜蓿的耐盐碱阈值以及紫花苜蓿的产量与土壤理化性质的相关性进行了研究, 研究结果可为苏打盐渍土的精细化管理与利用提供理论基础与数据支持。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地点选择吉林省白城市的亚亨农牧业有限

公司(图 1, $45^{\circ}34'36''-45^{\circ}34'29''N$, $123^{\circ}2'24''-123^{\circ}2'47''E$)。2008 年, 该公司被确定为省级重点农业产业化龙头企业, 拥有草原 $1\ 800\ \text{hm}^2$, 饲草用地 $417\ \text{hm}^2$ 。该公司位于吉林省白城市道保镇新发窝棚村, 该区域的土壤盐分以 Na_2CO_3 和 NaHCO_3 为主, 属于典型苏打盐渍土。温带大陆性季风气候, 昼夜温差大, 气候季节性明显。春季干旱多风少雨, 夏

季炎热且降雨集中, 雨热同期, 冬季严寒少雪。

据白城气象局的数据显示(图 2), 该地区 2008 年至 2015 年年均降水量为 $415.95\ \text{mm}$, 约 75% 的雨



图 1 试验区示意图及样点分布

Fig. 1 The location of the experiment site and the soil sample plots

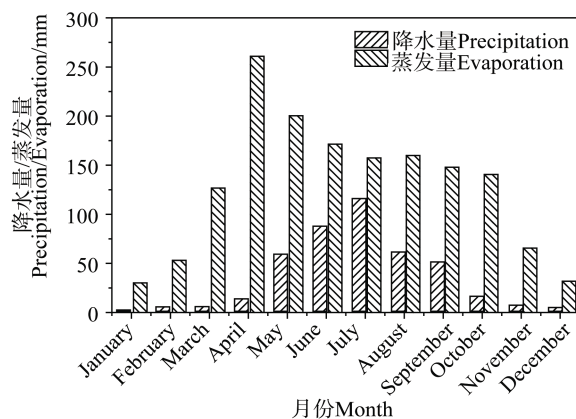


图 2 试验区区域年均降水量与年均蒸发量

Fig. 2 The annual precipitation and evaporation in the study site

1.2 研究方法

以盐碱化紫花苜蓿人工草地土壤为研究对象, 该研究区域长×宽为 $600\ \text{m} \times 450\ \text{m}$ (图 1)。于 2017 年 5 月 10 日采用 Veris 3100 测定土壤表观电导率。然后以网格法设置取样调查点, 间距为 $50\ \text{m} \times 50\ \text{m}$ 采样点, 采集土壤原状土(采样深度为 $0\sim 15\ \text{cm}$ 和 $15\sim 30\ \text{cm}$)以测定土壤容重(BD)和土壤质量含水量(MWC), 此外, 采用土钻取土样(采样深度

为 $0\sim 15\ \text{cm}$ 和 $15\sim 30\ \text{cm}$)以测定土壤盐碱指标(pH、EC、钠吸附比和总碱度), 每个采样点采用 GPS 标记定位点。在 2017 年 10 月 10 日和 2018 年 5 月 10 日测定紫花苜蓿的株高(SH)、生物量(以地上部分干物质量计)(DM)、盖度(CD)、生物多样性指数(Shannon-Weiner Index, SWI)以及单位面积内的植物物种数量(SW)。

紫花苜蓿的生物生态学指标测定: 以定位采样点为中心, $10\ \text{m}$ 为半径的圆形区域内随机选择 3 个 $1\ \text{m} \times 1\ \text{m}$ 样方, 在样方内测定紫花苜蓿的株高(SH)、干物质量(DM)以及紫花苜蓿的盖度(CD)。各参数的测定方法如下: 刈割 $1\ \text{m} \times 1\ \text{m}$ 样方内的紫花苜蓿, 留茬不高于 $5\ \text{cm}$, 并立即用电子天平称重即为单位面积紫花苜蓿的鲜物质量, 测定后将刈割的紫花苜蓿进行晾晒, 恒重后为单位面积紫花苜蓿的干物质量(Dry Biomass, DM); 紫花苜蓿的株高(SH)采用直尺测定, 每个样方内测定 5 次紫花苜蓿的株高取平均值; 样方内紫花苜蓿盖度采用目测法测定。单位面积植物物种数量采用调查法测定, 即统计样方内植物的数量, Shannon-Weiner 指数(SWI)采用下式计算:

$$H' = -\sum_{i=1}^r P_i (\ln P_i) \quad (1)$$

$$P_i = n_i / N \quad (2)$$

式中, N 为群落中所有种的个体总数, n_i 为第 i 种的个体数目, P_i 样品中属于第 i 种的个体的比例, 如样品总个体数为 N , 第 i 种个体数为 n_i , 则 $P_i = n_i / N$;

土壤盐分指标采用水:土 = 5:1 测定, 即 30 g 土加入 150 mL 蒸馏水, 充分搅拌后, 静置 2 h 以上测定悬浊液的 pH 和 EC, 然后将悬浊液抽滤, 测定滤液的 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 。 K^+ 和 Na^+ 采用火焰光度计测定, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 采用 EDTA 滴定法测定, CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 采用 H_2SO_4 滴定法测定。土壤钠吸附比 (SAR) 和总碱度 (TA) 以式 (1) 和式 (2) 计算。

$$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{[Ca^{2+} + Mg^{2+}]/2}} \quad (3)$$

式中, $[Na^+]$: Na^+ 当量浓度, $mmol \cdot L^{-1}$; $[Ca^{2+} + Mg^{2+}]$: Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 当量浓度之和, $mmol \cdot L^{-1}$;

$$TA = [CO_3^{2-}]/2 + [HCO_3^-] \quad (4)$$

式中, TA: 土壤总碱度, $mmol \cdot L^{-1}$; $[CO_3^{2-}]$: CO_3^{2-} 当量浓度, $mmol \cdot L^{-1}$; $[HCO_3^-]$: HCO_3^- 当量浓度, $mmol \cdot L^{-1}$;

土壤容重采用环刀法测定, 每个点取两层 (0~15 cm 和 15~30 cm) 土壤样品; 土壤质量含水量在土壤容重取样时测定。

$$\rho_b = \frac{m_s}{V} \quad (5)$$

式中, ρ_b : 容重, $g \cdot cm^{-3}$; V : 环刀内土壤总体积, cm^3 ; m_s : 环刀内土壤干重, g;

$$MWC = \frac{m_f - m_s}{m_s} \times 100\% \quad (6)$$

式中, MWC: 土壤质量含水量, $g \cdot kg^{-1}$; m_f : 土壤湿重, g; m_s : 土壤干重, g。

1.3 数据处理与分析

利用地统计软件 (Golden Software + 7.0) 对试验区盐碱化人工草地 (0~15 cm 和 15~30 cm 层) 土壤理化性质的空间变异理论模型及模型参数进行计算。而后采用 Surfer 10.0 绘制土壤理化性质的空间变异图。采用 SPSS 20.0 对试验数据进行统计描述, 计算土壤理化性质与盐碱化人工草地牧草生物学特征的极值、均值与标准误。采用多元线性回归 (Step-Wise) 量化盐渍化紫花苜蓿人工草地牧草生物量与土壤理化性质之间的关系。

2 结果与讨论

2.1 土壤基本理化性质

采用 SPSS 20.0 计算盐碱化人工草地 0~15 cm 与 15~30 cm 层土壤理化性质的极值、均值、均值的标准误以及方差, 结果如表 1 所示。

由表 1 可知, 盐碱化人工草地 0~30 cm 的土壤化学性质差异性较大。具体表现为盐碱化人工草地 0~15 cm 的土壤 pH 范围为 7.17~9.92, 均值为 9.00, 变异系数为 6.76%, 而 15~30 cm 的土壤 pH 的极小值与极大值分别为 7.29 和 9.97, 均值为 9.09, 变异系数达 7.18%, 表明盐碱化人工草地土壤 pH 的变异性较小。0~15 cm 和 15~30 cm 层土壤 EC 变异系数分别为 70.40% 和 63.04%, 均值分别为 $259.65 \mu S \cdot cm^{-1}$ 和 $322.72 \mu S \cdot cm^{-1}$, 表明 0~30 cm 层的土壤 EC 高且变异性强。0~15 cm 的土壤 SAR 范围为 0.29~14.52 ($mmol \cdot L^{-1}$)^{1/2}, 均值为 $3.01 (mmol \cdot L^{-1})^{1/2}$, 而 15~30 cm 层的土壤 SAR 则由 $0.22 (mmol \cdot L^{-1})^{1/2}$ 增加至 $20.10 (mmol \cdot L^{-1})^{1/2}$, 为 $6.39 (mmol \cdot L^{-1})^{1/2}$, 变异系数则均为 70.48%, 表明盐碱化人工草地 0~30 cm 的土壤 SAR 具有强变异性。0~15 cm 和 15~30 cm 层土壤总碱度均值分别为 $0.37 mmol \cdot L^{-1}$ 和 $3.52 mmol \cdot L^{-1}$, 且 15~30 cm 的土壤总碱度具有更高的变异性。

此外, 盐碱化人工草地 0~15 cm 的土壤容重极值分别为 $0.87 g \cdot cm^{-3}$ 和 $1.83 g \cdot cm^{-3}$, 均值为 $1.51 g \cdot cm^{-3}$, 而变异系数为 11.16%; 而 15~30 cm 的土壤容重范围为 $1.32 \sim 1.90 g \cdot cm^{-3}$, 均值为 $1.68 g \cdot cm^{-3}$, 变异系数 6.71%, 表明 0~15 cm 的土壤容重变异性高于 15~30 cm 层土壤容重的变异性。0~15 cm

表 1 盐碱化人工草地土壤基本理化特征

Table 1 The statistical results of soil physical and chemical properties of saline-alkali artificial grassland

土层 Soil layer/ cm	土壤理化性质 Physicochemical property	最小值 Min.	最大值 Max.	均值 Mean	标准误差 S.E.	变异系数 CV/%
0~15	pH	7.17	9.92	9.00	0.06	6.76
	电导率 EC/ ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	39.1	1 074	259.65	17.59	70.40
	容重 Bulk density / ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1.09	1.83	1.50	0.02	11.16
	钠吸附比 Sodium adsorption ratio / ($\text{mmol}_c\cdot\text{L}^{-1}$) ^{1/2} ;	0.29	14.52	3.01	0.26	70.48
	总碱度 Total alkalization / ($\text{mmol}_c\cdot\text{L}^{-1}$)	0.12	0.85	0.37	0.02	52.07
	质量含水量 Mass water content / ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	1.36	31.19	10.76	0.49	47.22
15~30	pH	7.29	9.97	9.09	0.06	7.18
	电导率 Electrical conductivity / ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	30.3	1 000	322.72	19.57	63.04
	容重 Bulk density / ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1.32	1.90	1.68	0.011	6.712
	钠吸附比 Sodium adsorption ratio / ($\text{mmol}_c\cdot\text{L}^{-1}$) ^{1/2} ;	0.22	20.10	6.39	0.43	70.48
	总碱度 Total alkalization / ($\text{mmol}_c\cdot\text{L}^{-1}$)	1	8.3	3.52	0.15	45.54
	质量含水量 Mass water content / ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	5.16	41.41	13.07	0.40	31.87

的土壤质量含水量从 $1.36 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增加至 $31.19 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均值为 $10.76 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 15~30 cm 的土壤质量含水量极值分别为 $5.16 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $41.41 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均值为 $13.07 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 而 0~15 cm 和 15~30 cm 层土壤质量含水量的变异系数分别为 47.22% 和 31.87%, 表明 0~15 cm 层的土壤质量含水量的变异性较 15~30 cm 的土壤质量含水量的变异性强。

2.2 盐碱化人工草地土壤盐碱性质的空间分布特征

2.2.1 盐碱化人工草地土壤水盐含量空间结构特征

目前, 普遍接受结构性因素如气候、成土母质、地形地貌、土壤类型等可导致土壤理化性质具有较强的空间相关性, 而随机性因素如耕作措施、种植制度以及施肥灌溉等人为因素可导致土壤理化性质的空间相关性变弱, 向着均质化方向发展^[10-13]。通常地统计学中块金值与基台值的比值 ($C_0/(C_0+C)$) 称为块金效应, 其值代表系统变量空间变异的相关程度。当 $C_0/(C_0+C) < 25\%$ 时, 系统具有强烈的空间相关性, 在 25%~75% 之间时, 系统具有中等的空间相关性^[14-15]。本研究利用地统计软件 (GS+ 7.0) 对试验区盐碱化人工草地 (0~15 cm 和 15~30 cm) 土壤盐碱性质的空间变异理论模型及模型参数进行计算, 结果如表 2 所示。

块金值 (C_0) 表示变量的随机部分空间变异特征^[16]。本研究中, 盐碱化人工草地 0~15 cm 层土壤盐碱性质的块金值从高到低依次为: 电导率 (EC) > 质量含水量 (MWC) > pH > 总碱度 (TA), 而 15~30 cm 层土壤盐碱性质的块金值从高到低依次为: EC > MWC > pH > TA。此外, 0~15 cm 层的土壤 pH、EC 和 MWC 的块金值大于 15~30 cm 层的土壤 pH、EC 和 MWC 的块金值, 而 TA 在 0~15 cm 层和 15~30 cm 层的块金值则呈相反规律。

盐碱化人工草地土壤盐碱性质的块金值结果表明, 土壤 EC 的随机部分空间变异特征最高, 其次为土壤质量含水量, 而土壤总碱度的随机部分空间变异特征小于其他理化参数。

基台值 (C_0+C) 表示区域变量的最大变异, 其值的大小与变量的空间变异性的程度正相关, 即 C_0+C 的值越大变量的空间变异性越高^[10]。本研究中, 盐碱化人工草地土壤理化参数基台值从高到低依次为: EC > MWC > SAR > pH > TA > BD。0~15 cm 层的土壤 pH 和土壤 EC 的基台值小于 15~30 cm 层的土壤 pH 和土壤 EC 的基台值, 而 MWC、BD、SAR 和 TA 则为 0~15 cm 层的基台值大于 15~30 cm 层的基台值。盐碱化人工草地土壤盐碱参数的基台值结果表明, 0~30 cm 层的土壤 EC 的空间变异

表 2 土壤理化性质的空间变异理论模型及参数

Table 2 The theoretical model of spatial variation of soil physico-chemical properties

土层	土壤理化性质	块金值	基台值	变程	决定系数	残差平方和	块金效应	模型
Soil layer	Physicochemical property	C_0	C_0+C	Range	R^2	Residual SS	C_0/C_0+C	Model
0~15	质量含水量 ^① / ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	13.38	34.45	2132.7	0.67	11.9	0.39	指数模型
	电导率 EC/ ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	6200	37190	78.98	0.34	4.86×10^7	0.17	高斯模型
	pH	0.19	0.42	260.7	0.99	1.50×10^{-4}	0.46	球状模型
	总碱度 ^② / ($\text{mmol}_c\cdot\text{L}^{-1}$)	0.0053	0.0417	128.4	0.59	3.37×10^{-5}	0.13	指数模型
15~30	质量含水量 ^① / ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	13.4	34.4	2132.7	0.67	11.9	0.39	指数模型
	电导率 EC/ ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	6400	45110	89.4	0.55	1.54×10^7	0.14	指数模型
	pH	0.24	0.49	289.7	0.99	2.15×10^{-4}	0.49	球状模型
	总碱度 ^② / ($\text{mmol}_c\cdot\text{L}^{-1}$)	0.0031	0.03132	73.2	0.674	2.08×10^{-6}	0.1	指数模型

①Mass water content, ②Total alkalization

性的程度最高，其次为土壤质量含水量，而土壤容重的空间变异性程度最低。此外，0~15 cm 的土壤 pH 和 EC 的空间变异性程度小于 15~30 cm 的空间变异性程度，MWC 和 TA 的空间变异性程度则为 0~15 cm 高于 15~30 cm 的空间变异性程度。

空间变异性强的变量其变异主要是由土壤质地、地形、土壤类型等结构性因素引起的；中等空间变异主要是由结构性因素与随机因素（人为因素与土壤微变异等）共同作用的结果。本研究中，盐碱化人工草地 0~30 cm 层土壤的表现出中等和强烈的空间变异性。具体表现为 0~30 cm 层的土壤 EC 和土壤总碱度的块金效应均小于 25%，表现出强烈的空间变异特性，而 0~30 cm 层的土壤 pH 的块金效应在 25%~75%，表现出中等的空间变异性。盐碱化人工草地 0~15 cm 层的土壤容重为强烈的空间变异特性；0~30 cm 层的土壤质量含水量块金效应在 25%~75%之间，表现为中等空间变异特性。

模型拟合结果表明，盐碱化人工草地土壤质量含水量与土壤总碱度均呈指数函数；土壤 pH 则呈球状函数；土壤表层 EC 为高斯函数，亚表层为指数函数。

本研究中，盐碱化人工草地土壤盐碱性质空间变异性主要表现为 0~15 cm 和 15~30 cm 土壤的 pH、EC、TA 以及土壤质量含水量具有中度或强空间变异（ $0.1\%<C_0/C_0+C<46\%$ ），0~30 cm 土壤 EC 与 TA 的强空间变异性表明，EC 与 TA 主要受气候

与成土母质的影响，而表现出强烈的空间依赖性，随机因素的作用效果不显著，这主要是松嫩平原的成土母质、地形地貌、气候等自然因素导致土壤可溶性盐中以 NaHCO_3 和 Na_2CO_3 为主^[17-18]。而 0~30 cm 土壤 pH 与 MWC 为中等空间变异性，表明试验区 0~30 cm 的土壤 pH 和 MWC 受结构性因素与随机因素共同作用的结果，而人为干扰因素较小。因此，土壤 pH 与 MWC 的中等空间变异性是由结构性因素造成的，是受气候与土壤共同作用的结果。此研究结果与蒋勇军等^[19]的研究结果一致，即土壤理化性质不是纯随机变量，而是区域性变量，既有随机性也包括结构性。

2.2.2 盐碱化人工草地土壤水盐空间分布特征

土壤盐渍化严重制约着土地可持续利用与生态系统的稳定性^[3]，特别是在松嫩平原这种降雨量低而蒸发量大的干旱与半干旱地区，土壤盐渍化问题更加严重^[20]。研究土壤空间变异特征是盐渍化土地管理与利用和精细化农业的理论基础与重要途径^[5-6]。本研究利用地统计软件 Surfer 10.0 对盐碱化人工草地土壤盐碱参数进行 Kriging 插值，绘制试验区域土壤表层（0~15 cm）与亚表层（15~30 cm）的土壤质量含水量（图 3a 与图 3b）、pH（图 3c 与图 3d）、EC（图 4a 与图 4b）与 TA（图 4c 与图 4d），观察空间变异特征。

由图 3 可知，表层土壤水盐具有较高的空间变异性，而亚表层土壤的空间变异性则相对较低。表层土壤的质量含水量（图 3a）高值区的面积大于亚

表层土壤质量含水量 (图 3b) 的高值区面积。盐碱化人工草地土壤 pH 总体表现为东部与西部高而中间低的趋势, 且表层 (图 3c) 与亚表层 (图 3d) 土壤 pH 的空间变异性规律基本一致, 即表层与亚表层土壤 pH 在水平方向上的空间变异性具有较高的相似性。

由图 4 可知, 盐碱化人工草地土壤 EC 空间变异特性基本一致, 然而亚表层土壤 EC (图 4b) 的高值区面积较表层土壤 EC (图 4a) 的高值区面积

大; 此外, 表层土壤 EC 的高值区主要分布于试验区的中部, 而亚表层土壤 EC 的高值区亦主要分布于试验区的中部, 但土壤 EC 值高于表层。盐碱化人工草地亚表层土壤总碱度 (图 4d) 的空间变异特性较表层土壤总碱度 (图 4c) 的空间变异特性强。此外, 表层土壤总碱度的高值区主要分布于试验区的北部, 而亚表层土壤总碱度的高值区则主要分布于试验区的北部与东南部, 且亚表层土壤总碱度的高值区面积更大。

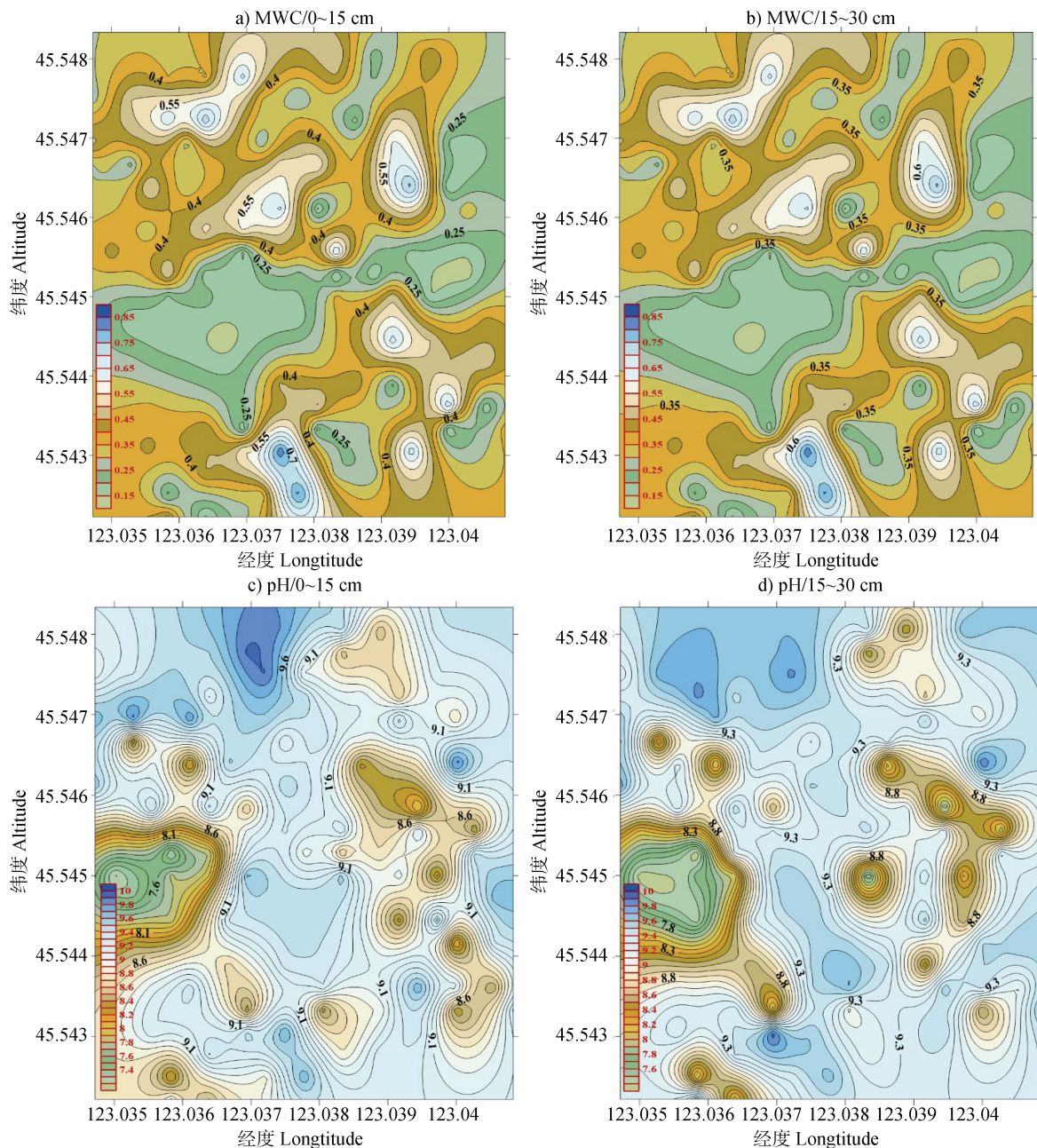


图 3 盐碱化人工草地土壤质量含水量与 pH 空间变异特征

Fig. 3 The spatial variation of soil mass water content (MWC) and pH in the saline-alkali artificial grassland

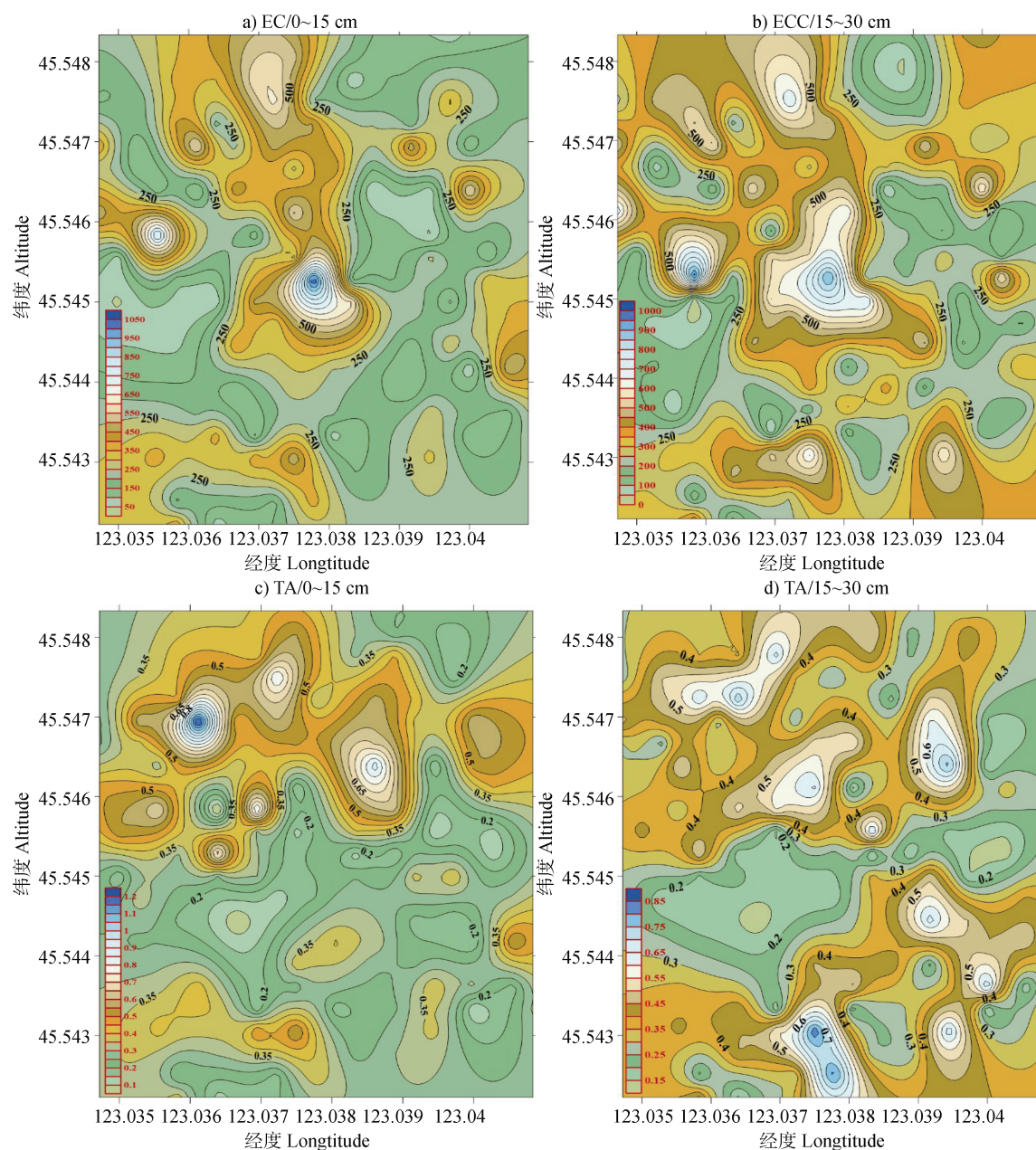


图 4 碱化人工草地土壤 EC 与土壤 TA 空间变异特征

Fig. 4 The spatial variation of soil electrical conductivity (EC) and Total alkalization (TA) in the saline-alkali artificial grassland

土壤空间变异性是尺度函数,即尺度效应^[21],小尺度的研究难以代表区域性的变异特征。本研究仅对小尺度的土壤空间变异性进行了研究,难以代表松嫩平原大尺度上的土壤空间变异性,因此松嫩平原大尺度土壤空间变异特征有待进一步研究。

2.3 盐碱化人工草地牧草生物学参数的空间变异特征

松嫩平原的盐碱化草地独特气候、水文状况与成土母质等结构性因素决定了该区域土壤具有较强

的空间变异性,因此研究松嫩平原盐碱化草地土壤的空间变异特征对盐碱化草地的生态恢复与合理利用具有重要意义。因此,本研究采用 GS+7.0 计算盐碱化人工草地 0~15 cm 与 15~30 cm 层盐碱化人工草地生物多样性指数(Shannon-Wiener Index, SWI)、干物质量(dry biomass, DM)、紫花苜蓿株高(shoot height, SH)、紫花苜蓿盖度(coverage degree, CD)以及单位面积植物物种数量(specie amount of plant in 1 m², SW)的地统计学特征进行了计算,结果如表 3 所示。

表 3 基于经典统计学的盐碱化人工草地牧草生物学特征

Table 3 The forage biological characteristics in saline-alkali artificial grassland based on classical statistics

	生物多样性指数	干物质量 Dry	紫花苜蓿株高	紫花苜蓿盖度	单位面积植物物种数量
	Shannon-Weiner	biomass	Shoot height	Coverage degree	Specie amount of
	Index	/ (g·m ⁻²)	/cm	/%	plant in 1 m ²
块金值 C ₀	0.01	5 700	114	14.4	0.026
基台值 C ₀ +C	0.118 2	47 800	1 425	112.3	1.984
决定系数 R ²	0.428	0.425	0.4	0.909	0.42
残差平方和 Residual SS	7.18×10 ⁻⁴	4.39×10 ⁷	19 179	44.2	0.124
块金效应 C ₀ /C ₀ +C	0.084 6	0.119 2	0.08	0.128	0.013
模型 Model	球状模型	球状模型	指数模型	指数模型	指数模型

由表 3 可知,盐碱化人工草地各生物-生态学参数的块金效应值从高到低依次为:CD>DY>SWI>SH>SW。盐碱化人工草地牧草生物-生态学参数的块金效应均小于 25%,表明均具有强烈的空间变异特征。因此,可以认为本研究中盐碱化人工草地生物多样性指数、紫花苜蓿生物量、牧草盖度、生物量、单位面积植物物种数量与土壤的空间变异性强烈相关,即受结构性因素的影响。

2.4 盐碱化人工草地牧草生物量与土壤盐碱性质的关系

盐碱化人工草地紫花苜蓿盖度与盐碱化人工草地单位面积植物物种数量均具有强空间变异性。此外,盖度、单位面积植物物种数量与生物量均与 0~30 cm 土壤 pH 和 EC 呈显著负相关 ($P<0.01$),而 Zaid 等^[22]的研究结果也表明土壤 pH 可显著影响紫花苜蓿的产量 ($P<0.05$)。改良盐碱地土壤,降低盐碱化程度,减小土壤空间差异性,有利于提高盐碱化人工草地的生产力。本研究将数据标准化后,进行逐步线性回归 (MLR-step wise) 以定量化牧草干重与土壤理化参数间的关系。盐碱化人工草地干物质量 (DM) 仅与 0~30 cm 的土壤 pH 呈最优线性关系, R^2 达到了 0.403,即盐碱化人工草地紫花苜蓿干物质量 (DM) 增减量的 40.3%可用 0~30 cm 的土壤 pH 解释。

因 MLR-step wise 与相关性分析的结果表明盐碱化人工草地干物质重 (DM) 与土壤 pH 相关性最高,可用 DM 与土壤 pH 之间的线性关系表示,因此将二者进行曲线拟合,结果如式 (7):

$$Y (DM) = 2699.73-276.496 \text{ pH} \quad (7)$$

式中, Y (DM): 单位面积紫花苜蓿干重, g·m⁻²; 7.17<pH<9.76。

在试验区土壤 pH 值范围内,随着土壤 pH 的增加,单位面积紫花苜蓿的干重降低,当 0~30 cm 土壤 pH 增加到 9.76 时,盐碱化人工草地的生物量为 0 g·m⁻²,表明紫花苜蓿对土壤 pH 的耐受上限为 9.76。

综上所述,本研究中试验区盐碱化人工草地牧草产量与土壤 pH 和 EC 呈极显著负相关 ($P<0.01$),且盐碱化紫花苜蓿人工草地的产量可以采用土壤 pH 和土壤质量含水量进行预估,即式 $Y (DM) = 2\,699.73-276.496\text{pH}$ ($R^2 = 0.403$, 7.17<pH< 9.76)。

3 结 论

本研究通过对盐渍化紫花苜蓿人工草地土壤理化性质以及牧草生物学特征的空间变异特征进行研究,得到以下主要结论: 0~30 cm 的土壤理化性质中 EC (0~30 cm 层) 与 TA (0~30 cm 层) 具有强空间变异特性 ($C_0/C_0+C<25\%$),其空间变异特征主要是由地形、水文与气候等结构性因素引起的;而其他理化参数为中等空间变异性 ($25\%<C_0/C_0+C<75\%$),其变异主要是由随机因素和结构性因素共同作用引起的;此外,盐碱化人工草地盖度、生物量干重、Shannon-Wiener 指数、紫花苜蓿株高以及单位面积植物种类数量均具有强空间变异特征

($C_0/C_0+C<25\%$), 表明其均与土壤空间变异特征强烈相关; 最后, 本研究发现盐碱化紫花苜蓿人工草地的产量可以用土壤的 pH 和 MWC 进行预估, 即 $Y(DM) = 2699.73 - 276.496 \text{ pH}$ ($R^2 = 0.403$, $7.17 < \text{pH} < 9.76$)。

参考文献 (References)

- [1] Lin N F, Tang J, Bian J M, et al. The quaternary environmental evolution and the problem of desertification in Northeast Plain[J]. Quaternary Sciences, 1999, 19 (5): 448—455. [林年丰, 汤洁, 卞建民, 等. 东北平原第四纪环境演化与荒漠化问题[J]. 第四纪研究, 1999, 19 (5): 448—455.]
- [2] Hua J X, Zang S Y, Na X D. Retrieval of soil salinization process and its dynamic change in Songnen Plain[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37 (1): 155—160. [花锦溪, 臧淑英, 那晓东. 松嫩平原盐碱化反演及其动态变化过程[J]. 水土保持通报, 2017, 37 (1): 155—160.]
- [3] Scudiero E, Skaggs T H, Corwin D L. Comparative regional-scale soil salinity assessment with near-ground apparent electrical conductivity and remote sensing canopy reflectance[J]. Ecological Indicators, 2016, 70: 276—284.
- [4] Córdova C, Sohi S P, Lark R M, et al. Resolving the spatial variability of soil N using fractions of soil organic matter[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2012, 147: 66—72.
- [5] Wu J, Xie Y L, An B J. The status and development countermeasures of precision agriculture in China[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2013, 45 (9): 118—121. [武军, 谢英丽, 安丙俭. 我国精准农业的研究现状与发展对策[J]. 山东农业科学, 2013, 45 (9): 118—121.]
- [6] Li H B. The dynamic process of plant responses to heterogeneous nutrient environments and the strategies of root management for nutrient acquisition[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. [李洪波. 植物响应养分空间异质性分布的动态过程及调控根系获取养分的策略研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.]
- [7] Chaopricha N T, Marín-Spiotta E. Soil burial contributes to deep soil organic carbon storage[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 69: 251—264.
- [8] Zhao C W. Spatial variations and homogenized reclamation of sodic soil of west Jilin Province [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. [赵长巍. 吉林省西部盐渍土空间变异性与均质化改良研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.]
- [9] Yang F, Deng W, Zhang G X, et al. Spatial variation of soil saline ions and its relations with vegetation community of *Phragmites australis* in a saline-sodic soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45 (4): 594—600. [杨帆, 邓伟, 章光新, 等. 苏打盐渍土地区芦苇土壤盐分离子空间变异与群落关系研究[J]. 土壤学报, 2008, 45 (4): 594—600.]
- [10] Wang Q J, Bi L, Zhang J H. Spatial variability analysis of large-scale soil water, salt and heat characteristics in Baotou lake irrigation area of Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34 (18): 138—145, 316. [王全九, 毕磊, 张继红. 新疆包头湖灌区农田土壤水盐热特性空间变异特征[J]. 农业工程学报, 2018, 34 (18): 138—145, 316.]
- [11] Zhang H, Zhang G L. Soil quality indicators and its evaluation methods [J]. Soils, 2001, 33 (6): 326—330, 333. [张华, 张甘霖. 土壤质量指标和评价方法[J]. 土壤, 2001, 33 (6): 326—330, 333.]
- [12] Chien Y J, Lee D Y, Guo H Y, et al. Geostatistical analysis of soil properties of mid-west Taiwan soils[J]. Soil Science, 1997, 162 (4): 291—298.
- [13] Di H J, Kemp R A, Trangmar B B. Use of geostatistics in designing sampling strategies for soil survey[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53 (4): 1163—1167.
- [14] Xiao D N, Li X Y, Song D M, et al. Spatiotemporal dynamic simulation of groundwater exploitation in Minqin oasis[J]. Science in China: Series D: Earth Sciences, 2006, 36 (6): 567—578. [肖笃宁, 李小明, 宋冬梅, 等. 民勤绿洲地下水开采时空动态模拟[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, 36 (6): 567—578.]
- [15] Guo X D, Fu B J, Chen L D, 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. [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.]
- [16] Wang Z Q. Geostatistics and its application in ecology [M]. Beijing: Science Press, 1999: 150—156. [王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 150—156.]
- [17] Wang M M, Rengasamy P, Wang Z C, et al. Identification of the most limiting factor for rice yield using soil data collected before planting and during the reproductive stage[J]. Land Degradation & Development, 2018, 29 (8): 2310—2320.
- [18] Lin N F, Wang J, Tang J, et al. Character and mechanism of soil degradation in west of Jilin Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2003, 23 (2): 1—4, 8. [林年丰, 王娟, 汤洁, 等. 吉林省西部土壤退化特征及机理分析[J]. 水土保持通报, 2003, 23 (2): 1—4, 8.]
- [19] Jiang Y J, Yuan D X, Xie S Y, et al. Spatial variability of soil organic matter content in a typical Karst watershed: Case study of Xiaojiang watershed, Yunnan Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27 (5):

- 2040—2047. [蒋勇军, 袁道先, 谢世友, 等. 典型岩溶流域土壤有机质空间变异——以云南小江流域为例[J]. 生态学报, 2007, 27 (5): 2040—2047.]
- [20] Wichelns D, Qadir M. Achieving sustainable irrigation requires effective management of salts, soil salinity, and shallow groundwater[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 157: 31—38.
- [21] Zhao J, Liu H J, Sui Y Y, et al. Analysis for spatial heterogeneity of organic matter content and available nutrients in blacksoil crop area with different scales[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20 (1): 41—44, 62. [赵军, 刘焕军, 隋跃宇, 等. 农田黑土有机质和速效氮磷不同尺度空间异质性分析[J]. 水土保持学报, 2006, 20 (1): 41—44, 62.]
- [22] Zaid M S, Eid A H, Abd El Wahab A M, et al. Soil quality indicators effects on alfalfa productivity at El-Sadat center soil conditions[J]. *Agricultural Research & Technology*, 2017, 7 (5): 555725.

(责任编辑：檀满枝)