

锡林郭勒不同亚型草原土壤水盐空间 变化特点及影响因素

常帅^{1,2}, 于红博^{1,3,4}, 唐燕妮², 张巧凤^{1,3}

(1. 内蒙古师范大学 地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特 010022;

2. 鄂尔多斯市康巴什区未来学校, 内蒙古 鄂尔多斯 017010;

3. 内蒙古自治区遥感与地理信息系统重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010022;

4. 蒙古高原气候变化与区域响应自治区高等学校重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010022)

摘要: 利用描述性统计分析、地统计学、冗余分析等方法, 探究锡林郭勒盟的草甸草原、典型草原和荒漠草原在 0~50 cm 土层土壤水分和盐分的含量变化、空间变异性以及影响因素。研究表明:(1)土壤水分含量在 0~<5 cm 表现为典型草原>草甸草原>荒漠草原, 其余土层含水量均以草甸草原最高、荒漠草原最低;(2)在 30 cm 以下的土层中, 三种草原均呈重度盐渍化水平, 在 30 cm 以上的土层中, 各草原基本为中度或重度盐渍化水平, 总体上荒漠草原的盐渍化比其他两类草原要低;(3)土壤水分含量除 20~<30 cm 属于中等程度变异外, 其余土层均为强变异类型; 土壤含盐量除表层 0~<5 cm 属于中等程度变异外, 其余深度土层均为强变异类型;(4)土壤水分含量高值斑点在 0~<20 cm 土层变化剧烈, 在 20~50 cm 趋于稳定; 土壤盐分含量在 0~<5 cm 土层变化明显, 在 5~<20 cm 有所下降, 20 cm 以下随着土层深度的增加, 出现局部增大的趋势;(5)各亚型草原土壤含水量均与土壤全氮呈正相关性, 与 Simpson 指数呈负相关, 土壤含盐量均与土壤含水量呈正相关。各层土壤水分含量均以荒漠草原最低。土壤 pH 值是影响草甸草原和典型草原土壤盐分含量的主要因子, 土壤全磷是影响草甸草原土壤水分含量的主要因子, 在荒漠草原中土壤水盐因子互为主要影响因素。

关键词: 水盐特征; 空间分布; 冗余分析; 影响因素

中图分类号: S154.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8735(2026)01-0030-11

DOI: 10.3969/j.issn.1001-8735.2026.01.005

在干旱、半干旱区土壤极易发生盐渍化, 盐渍化已成为制约土地资源利用和农业可持续发展的关键问题^[1]。土壤水分和土壤盐分关系十分密切, 是表征一个地区是否存在盐渍化的重要依据^[2]。土壤水分是影响陆地生态系统的重要生态指标, 其微弱的变化就会引起土壤和植被的响应^[3-4]; 土壤盐分的变化, 也会影响土壤肥力和植物物种群落变化, 盐分过多积累会导致物种多样性减少^[5]。因此, 土壤水盐含量变化将会直接影响植物的生存和土壤的发展^[6]。对干旱、半干旱地区土壤水盐含量的变化特征进行研究, 可以促进土壤资源的综合开发和物种的恢复重建。

土壤是复杂的自然综合体, 在不同深度间具有高度的空间异质性, 探究土层间指标的空间分布特征及其变异性是土壤学的热点问题之一^[6]。随着地理信息系统的发展, 地统计学方法得到普遍应用, 该方法可以在一定程度上反映测量指标在空间上的随机性和结构性差异, 众多学者利用此方法对不同指标^[7-8]进行了相应的研究, 体现出地统计学在土壤空间分布探究上的优势和独特性。张霞等^[9]利用灰色

收稿日期: 2025-03-17

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金资助项目“锡林郭勒荒漠草原土壤种子库特征研究”(2023MS04005), “主被动微波遥感协同反演内蒙古草原区土壤含水量及干旱监测研究”(2021MS04015); 鄂尔多斯市康巴什区教育课题资助项目“基于核心素养下情境式教学与自主学习课堂实施策略研究”(2024KJKT026)。

作者简介: 常帅(1997-), 男, 在读硕士研究生。

通信作者: 于红博(1977-), 女, 副教授, 博士, 主要从事自然地理和遥感研究, E-mail: 1106275721@qq.com。

关联度分析了土壤水分和盐分的动态变化及影响因素,结果表明土壤盐分和降水、蒸腾蒸发关系密切,地下水是影响土壤盐分的主要因素。葛广华等^[10]利用相关性分析发现土壤水分和盐分与植被覆盖度和季节变化有关。张谦等^[3]对滨海盐碱地棉田土壤水盐进行了影响因素分析,发现土壤水盐变化主要受降水、蒸发量、土壤自身结构、植被盖度等因素影响。陈银磊等^[11]通过对农业开发区的土壤水盐研究,发现铵态氮对土壤盐分有所影响。赵明亮等^[12]对艾比湖不同生态类型土壤水盐进行分析,发现土壤 pH 值会影响土壤盐分含量。李晋波等^[13]对锡林郭勒草原不同放牧方式下土壤水分的空间分布和成因进行探究,发现在不同放牧方式下,土层深度不同,影响因素也不尽相同。谢静等^[14]分析了锡林郭勒草原不同植被类型下土壤水分特性,发现不同植被类型下土壤含水量随土层深度的变化有所区别。针对放牧方式、植被类型的土壤水盐研究已较为常见,但是在天然草原地区,探索不同草原类型土壤水盐的运移规律和主要影响因素对草原的生态恢复有重要意义。基于此,本文沿水热梯度采集样本并测定分析,以探究草甸草原、典型草原和荒漠草原三种草原类型土壤水分和盐分含量、空间变异性及其影响因素,以期草原土壤的合理利用以及牧草草场培育提供数据参考和依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区是北温带半干旱区向干旱区的过渡地带,东西跨度大,受不同程度降水和气温等条件的影响,形成了不同的草原景观,自东向西依次为草甸草原、典型草原和荒漠草原。该区域属于中温带干旱与半干旱大陆性气候,年平均气温在 2~4℃,年降水总量在 200~350 mm,且主要集中在 5—9 月(植被生长季)。地形主要以高原和平原为主,并伴有部分低山和盆地,总体上呈东南高,西北低的地势特点。草甸草原优势植物主要有贝加尔针茅(*Stipa baicalensis* Roshev.)、羊草(*Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel.)和线叶菊(*Filifolium sibiricum* (L.) Kitam.);典型草原优势植物为克氏针茅(*Stipa krylovii* Roshev.)和大针茅(*Stipa grandis* P. Smirn.);荒漠草原优势植物为小针茅(*Stipa klemenzii* Roshev.);浑善达克沙地以榆树疏林及部分沙地植被为主。土壤类型以风沙土和栗钙土为主^[15]。

1.2 数据来源与处理

研究区位置及采样点分布如图 1 所示,北部由东南向西北依次为草甸草原、典型草原和荒漠草原,中部为浑善达克沙地,南部为农牧交错带。根据研究区草原分布类型及植被生长状况,选取北部三种类型草原作为研究对象,各草原基本情况见表 1。

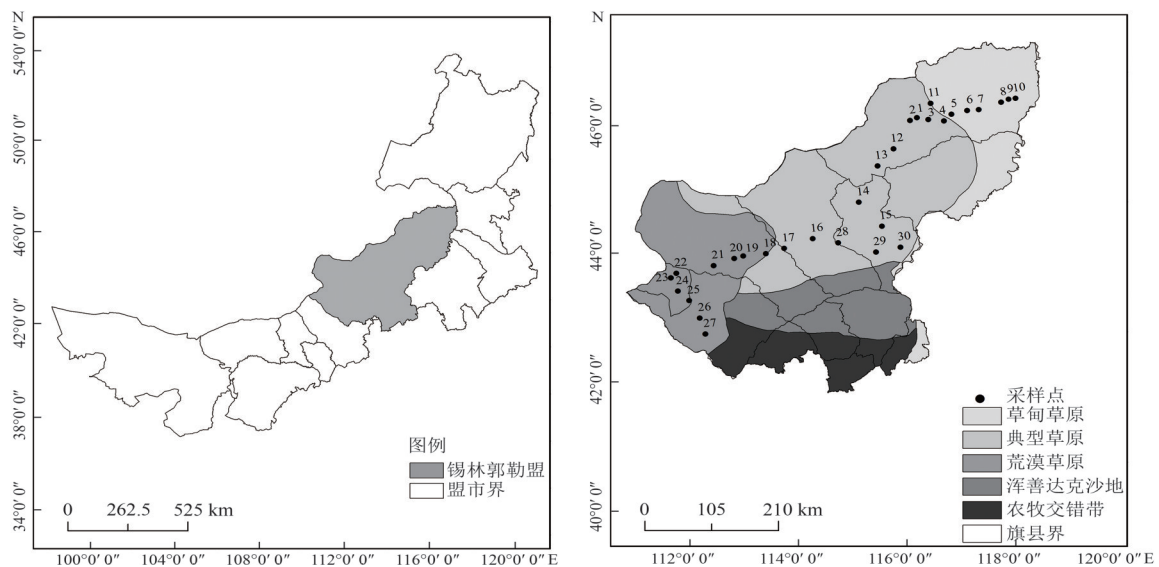


图 1 研究区位置及采样点分布

Fig. 1 The location of the study area and the distribution of sampling points

表 1 各样地基本情况

Tab. 1 The basic situation of various sites

样地类型	平均海拔/m	月均温/°C	月均降水量/mm	pH	土壤类型	植物密度/ (株 m ⁻²)	群落总盖度/%
荒漠草原	1 043.713	21.343	42.469	7.682	棕钙土、栗钙土	111.940	18.944
典型草原	1 018.699	20.172	62.004	7.834	栗钙土	442.190	36.416
草甸草原	921.330	19.916	79.992	8.208	淡黑钙土、栗钙土	403.970	56.500

根据锡林郭勒草原的水热条件差异,本研究自东向西沿水热梯度变化选取 30 个采样点,其中草甸草原 9 个,典型草原 12 个,荒漠草原 9 个。每个采样点取三次土壤样品和三个 1 m×1 m 的植物样方;土层深度为 0~50 cm,土样按 0~<5 cm、5~<10 cm、10~<20 cm、20~<30 cm、30~<40 cm 和 40~50 cm 深度分别采集。

土壤质量含水量(SMC)用烘干法测定;土壤含盐量(SSC)用电导率法测定 25 °C 下的电导率,再用电导率×0.334 得到^[16]。土壤化学性质包括有机质(OM)、全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)和 pH 值五项指标。测量方法参见《土壤农化分析》^[17]。

为确定影响不同草原类型土壤水盐含量的驱动因素,分别选取物理指标、化学指标和植物群落指标揭示草原中不同土层深度土壤含水量和含盐量的控制因子。其中物理指标选择海拔、坡度和坡向;化学指标采用实验数据;植物群落指标采用野外采集的 1 m×1 m 样方,通过计算得到相应数据。气象因子采用多年的平均值,数据通过中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)下载,并处理。

1.3 研究方法

1.3.1 地统计学 地统计学方法是以半变异函数为主要工具的一种无偏估计方法,其目的在于减少变量方差。半变异函数有三个主要参数,分别为块金值(C_0)、基台值(C_0+C)和变程(R)。块金值反映由于采样尺度及试验测量所引起的随机性变异;基台值指该指标所达到的最大方差值,主要包括由采样和试验所引起的随机性变异以及指标自身具有的结构性变异;变程指由初始的块金值达到基台值时采样点之间的距离,指示了空间关联的范围,超出该范围后,则不再具有空间相关性^[18]。

块基系数($C_0/(C_0+C)$)是衡量指标变量空间结构变化的重要标准。块基系数值<25%,说明指标具有强烈的空间变异性,主要受结构性因素影响;块基系数值>75%,说明指标具有弱空间变异性,主要受随机性因素影响;块基系数在 25%~75% 之间,属于中等程度变异,说明受随机性因素和结构性因素的共同作用^[10]。

半变异函数为

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2, \quad (1)$$

式中, $r(h)$ 为半变异函数值, h 为样点间的距离, $N(h)$ 为空间距离为 h 的样本个数; $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 表示空间位置 x_i 和 $x_i + h$ 的实际测量值。选取模型依据拟合度最大、残差最小的原则,拟合度是衡量半变异函数的重要参数。

1.3.2 冗余分析 冗余分析既是主成分分析方法的一种升级和改进,又是约束多元回归方法的一种模型。其解释变量和响应变量需要经过标准化处理,得到解释变量矩阵与响应变量矩阵^[19]。在本研究中分别对应物理指标、化学指标和植物群落指标等测试指标数据矩阵和 SMC、SSC 两个响应变量数据矩阵。SMC、SSC 数据矩阵为 $P \times N$, P 是 30 个样地采集的土壤含水量,土壤含盐量数据,共 30 次; N 是采样层数,共 6 层。测试指标数据矩阵为 $P \times Q$, Q 为各项解释测试指标。

在排序后的冗余分析图(RDA)中,射线表示土壤含水量、土壤含盐量及测试指标,测试指标的射线与土壤含水量、土壤含盐量射线之间的夹角可表示其关系。夹角为锐角,说明二者之间具有正相关关系;夹角为钝角,说明二者之间具有负相关关系。测试变量射线在该响应变量射线上的投影越长,代表该测试指标与该响应变量的相关性越大,反之亦然。

1.3.3 单因素方差分析 为明确这些样本的显著水平,本文采用单因素方差分析中的最小显著差数法(LSD),分析研究区内土壤水盐含量在不同处理水平下的显著性。LSD法需要先计算出显著水平为 α 的最小显著差数,记为 $LSD\alpha$,见公式(2),将其作为比较两个样本平均数差值的一个评判尺度。若两个样本平均数差值的绝对值 $\geq LSD\alpha$,则在 α 水平上差异显著,否则差异不显著^[20]。计算公式为

$$LSD\alpha = t_{\alpha} \sqrt{\frac{MS_e}{n}}, \quad (2)$$

式中, α 表示自由度, t_{α} 表示自由度为 α 时,通过查 t 值分布表所得的界值; MS_e 表示组内试验误差的均方, n 表示重复组数。

1.3.4 变异系数 变异系数(CV)是表征一组数据离散程度的统计量,通常用标准差和平均值的比值来表示,计算公式为

$$C = \frac{S_x}{\bar{x}} \times 100\%, \quad (3)$$

式中, S_x 指该组数据的标准差, \bar{x} 表示该组数据的平均值。当 $C < 10\%$,说明该组数据具有弱变异性; $C > 100\%$,该组数据具有强变异性; C 值在 $10\% \sim 100\%$ 之间,该组数据具有中等程度变异。 C 值越大,该组数据离散程度越大,变异程度越强; C 值越小,该组数据各样本差异越小,变异程度越弱。

1.3.5 植物群落指标计算 本文植物群落特征选取物种多样性指标,包括物种多样性指数(香农-威纳)指数(H)、辛普森多样性指数(D)(在本文中仅指植被群落的 Simpson 指数)、Margalef 丰富度指数(M)和 Pielou 均匀度指数(J),计算公式^[19]为

$$H = -\sum_{i=1}^S [(N_i/N) \times \ln(N_i/N)], \quad (4)$$

$$D = \sum_{i=1}^S (N_i/N)^2, \quad (5)$$

$$M = (S-1)/\ln N, \quad (6)$$

$$J = 1 - \sum_{i=1}^S [N_i(N_i-1)/N(N-1)]. \quad (7)$$

式中, S 为调查样方中的总物种数目, N 和 N_i 分别为样方中所有植物个体总数和第 i 种植物个体数。

1.3.6 土壤盐渍化评判标准 土壤电导率是反映土壤盐渍化程度的一个重要标准。按照王遵亲^[21]的《中国盐渍土》确定了干旱区、半干旱区土壤盐渍化的分类标准(表2),对不同草原类型背景下 $0 \sim 50$ cm 土层土壤进行盐渍化风险评价分析。

表2 土壤盐渍化分级分类标准

Tab. 2 The classification standard of soil salinization

标准	非盐渍化	轻度盐渍化	中度盐渍化	重度盐渍化	盐渍土
电导率/(dS m ⁻¹)	<0.243	0.243~<0.486	0.486~<0.972	0.972~1.458	>1.458

1.4 数据处理

应用 Excel2016 和 SPSS22 分析土壤水分和盐分的基本含量特征,计算群落数量特征。采用 GS+9.0 对各层土壤含水量和含盐量进行半变异分析,获得土壤各层水盐含量的最佳模型及最适参数。通过 Surfer 13 插值得到各层土壤含水量和土壤含盐量的等线分布图。利用 Canoco5 软件基于线性模型进行冗余分析,得到影响土壤含水量和土壤含盐量的关键因子。

2 结果分析

2.1 土壤水分和盐分含量特征分析

各类型草原不同土层深度土壤含水量特征见表3。由表3可知,在草甸草原,土壤含水量最大值在 $30 \sim <40$ cm处,除 $0 \sim <5$ cm土层的土壤含水量与其余各层具有显著性差异外($P < 0.05$),其余各层间差异不显著。在典型草原,土壤含水量最高值在 $10 \sim <20$ cm处,各层间差异不显著。在荒漠草原,

以 10 cm 土层深度为界,下层土壤含水量大于上层,且下层土壤含水量相当,0~10 cm 各土层土壤含水量均与 10~50 cm 各层土壤含水量具有显著差异($P<0.05$)。

表 3 各草原类型不同土层土壤水分含量及其变异系数

Tab. 3 Soil moisture content and its coefficient of variation in different soil layers of different grassland types

土深/cm	草甸草原		典型草原		荒漠草原	
	土壤含水量/%	变异系数	土壤含水量/%	变异系数	土壤含水量/%	变异系数
0~<5	4.094±2.707 Ba	0.661	5.290±0.046 Aa	0.870	0.831±0.419 Bb	0.503
5~<10	8.147±1.563 Aa	0.192	6.480±0.029 Aa	0.450	2.395±1.535 Bb	0.641
10~<20	8.383±2.340Aa	0.283	7.329±0.322 Aa	0.432	4.487±1.725 Ab	0.384
20~<30	9.509±1.973 Aa	0.208	6.055±0.025 Ab	0.411	4.651±2.309 Ab	0.497
30~<40	10.073±2.214 Aa	0.220	5.960±0.023 Ab	0.382	4.617±2.512 Ab	0.544
40~50	9.890±3.265 Aa	0.330	6.071±0.023 Ab	0.377	4.585±2.400 Ab	0.523

注:不同大写字母表示同一草原类型不同土层深度的含量在 0.05 水平上差异显著,不同小写字母表示同一土层不同草原类型的含量在 0.05 水平上差异显著。下同。

0~<5 cm 的土壤含水量为典型草原>草甸草原>荒漠草原,其余各层土壤含水量均为草甸草原>典型草原>荒漠草原。以 20 cm 土层为界,在 20 cm 以上土层,草甸草原和典型草原各土层土壤含水量均与荒漠草原土壤含水量具有显著差异($P<0.05$);在 20 cm 以下土层,草甸草原各层土壤含水量均与典型草原、荒漠草原的含水量具有显著差异($P<0.05$)。在三种草原类型中,各层土壤含水量的变异系数均呈中等程度的变异特征。

各类型草原各层土壤含盐量特征见表 4。结合表 1 土壤盐渍化程度的分类标准,在草甸草原,除 0~<5 cm 和 20~<30 cm 的土壤属于中度盐渍化外,其余各层土壤均属重度盐渍化。在典型草原,20 cm 以内的土壤属于中度盐渍化,20~<30 cm 和 40~50 cm 的土壤属于重度盐渍化,30~<40 cm 土壤盐渍化较为严重,发育为盐渍土。在荒漠草原,0~30 cm 土层土壤属于中度盐渍化,30 cm 以下土壤属于重度盐渍化。荒漠草原各层土壤盐渍化程度比其他两种草原低。

表 4 各草原类型不同土层土壤盐分含量及其变异系数

Tab. 4 The soil salt content and its coefficient of variation in different soil layers of different grassland types

土深/cm	草甸草原		典型草原		荒漠草原	
	土壤含盐量/ (dS m ⁻¹)	变异系数	土壤含盐量/ (dS m ⁻¹)	变异系数	土壤含盐量/ (dS m ⁻¹)	变异系数
0~<5	0.802±0.299 Aab	0.373	0.861±0.241 Ba	0.281	0.642±0.159 Cb	0.247
5~<10	1.135±0.881 Aa	0.776	0.813±0.282Bab	0.347	0.610±0.151 Cb	0.247
10~<20	1.155±0.836 Aa	0.724	0.899±0.347 Ba	0.386	0.796±0.206 BCa	0.259
20~<30	0.938±0.444 Aa	0.474	1.217±0.643ABa	0.529	0.878±0.388 BCa	0.442
30~<40	1.275±1.108 Aa	0.869	1.751±1.631 Aa	0.932	1.079±0.517 ABa	0.479
40~50	1.304±0.693 Aa	0.531	1.372±0.880 ABa	0.642	1.381±0.856 Aa	0.620

结合表 3 可知,在草甸草原,0~50 cm 各层土壤含盐量之间均没有显著差异;在典型草原,0~<20 cm 各层土壤含盐量与 30~<40 cm 的土壤含盐量具有显著差异($P<0.05$);在荒漠草原,0~<10 cm 各层土壤含盐量与 30~50 cm 的土壤含盐量具有显著差异($P<0.05$)。

0~<5 cm 的典型草原土壤含盐量和荒漠草原土壤含盐量具有显著差异($P<0.05$),在 5~<10 cm 草甸草原的土壤含盐量和荒漠草原的土壤含盐量具有显著差异($P<0.05$),其余各层土壤含盐量在不同草原类型间均未呈现显著差异。在三种草原类型中,各层土壤含盐量均呈中等程度的变异特征。

2.2 土壤水分和盐分含量的空间结构分析

各层土壤含水量除 0~<5 cm 和 10~<20 cm 呈正态分布外,其余均为对数正态分布类型,见表 5。各层最佳模型有所不同,0~<5 cm 属于指数函数模型,5~<10 cm 属于线性模型,10~<30 cm 属于球面函数模型,30~50 cm 属于高斯函数模型,拟合度均较低。变程在 5~<10 cm 较大,其余均较小,表明 5~<10 cm 土壤含水量的空间自相关程度最大。块基系数显示 20~<30 cm 土壤含水量属于中等程度空间变异性,该层土壤含水量变化受结构性因素(土壤粒径、土壤类型、土壤质地等自身结构性因素)和随机性因素(采土方式、试验误差等随机性人为因素)的共同作用,其余土层均具有强空间变异性,土壤含水量主要受结构性因素影响。

表 5 各层土壤水分和盐分含量的正态检验及模型参数

Tab. 5 The normal test and model parameters of soil water and salt contents in each layer

指标	土层深度/cm	最佳模型	块金值	基台值	变程/m	拟合度	块基系数	分布类型
土壤含水量	0~<5	Exponential	1.90×10^{-3}	5.78×10^{-2}	0.09	0.01	3.29	N
	5~<10	Linear	1.95×10^{-3}	2.69×10^{-2}	3.64	0.24	7.25	Log-N
	10~<20	Spherical	3.00×10^{-4}	2.61×10^{-1}	0.34	0.02	0.12	N
	20~<30	Spherical	9.70×10^{-2}	3.42×10^{-1}	0.40	0.05	28.36	Log-N
	30~<40	Gaussian	5.70×10^{-2}	4.97×10^{-1}	0.379	0.085	11.47	Log-N
	40~50	Gaussian	1.00×10^{-3}	4.48×10^{-1}	0.501	0.189	0.22	Log-N
土壤含盐量	0~<5	Exponential	7.16×10^{-4}	2.53×10^{-3}	92.64	0.56	28.28	Log-N
	5~<10	Gaussian	3.36×10^{-4}	1.35×10^{-3}	6.97	0.58	24.85	N
	10~<20	Gaussian	5.80×10^{-4}	3.91×10^{-3}	13.87	0.47	14.83	N
	20~<30	Gaussian	8.4×10^{-2}	8.36×10^{-1}	12.80	0.76	10.05	Log-N
	30~<40	Gaussian	9.90×10^{-2}	5.05×10^{-1}	8.10	0.71	19.60	Log-N
	40~50	Gaussian	1.24×10^{-1}	5.66×10^{-1}	9.58	0.58	21.91	Log-N

各层土壤含盐量除 5~<20 cm 呈正态分布外,其余均为对数正态分布类型。0~<5 cm 最佳模型为指数函数模型,其余各土层含盐量均属于高斯函数模型。土壤含盐量在 0~<20 cm 深度的块金值明显小于 20 cm 及以下土层,说明 20 cm 以内土壤含盐量受采样尺度或者试验误差等随机性因素影响较小。土壤盐分变幅在 6.97~92.64 m 之间,变化幅度较大,最大变程出现在 0~<5 cm 土层,表明土壤含盐量在表层 0~<5 cm 空间自相关范围大于其他土层。结合块基系数可知,除 0~<5 cm 属于中等变异外,其余均属于强变异类型,表明 0~<5 cm 土壤含盐量变化受结构性因素和随机性因素的共同作用,其余土层含盐量主要受结构性因素影响。

2.3 土壤水分和盐分含量的空间分布格局

各层土壤含水量的空间分布如图 2 所示。由图 2 可知,在 0~<5 cm 土层土壤含水量由东向西递减,变化较大,低值区中心靠近荒漠草原地区,高值区中心在草甸草原和典型草原的过渡地区,且含量明显呈辐射状分布。在 5~<20 cm 土层的土壤含水量基本是东高西低,变化减缓,斑点中心增加。在 20~50 cm 土层的等水线图变化态势基本相似,变化进一步减缓,土壤水分斑点在东北和西南方向集聚效应越发明显。锡林郭勒草原深层土壤含水量空间差异小于表层,土壤水分在深层的空间集聚效应强于表层。

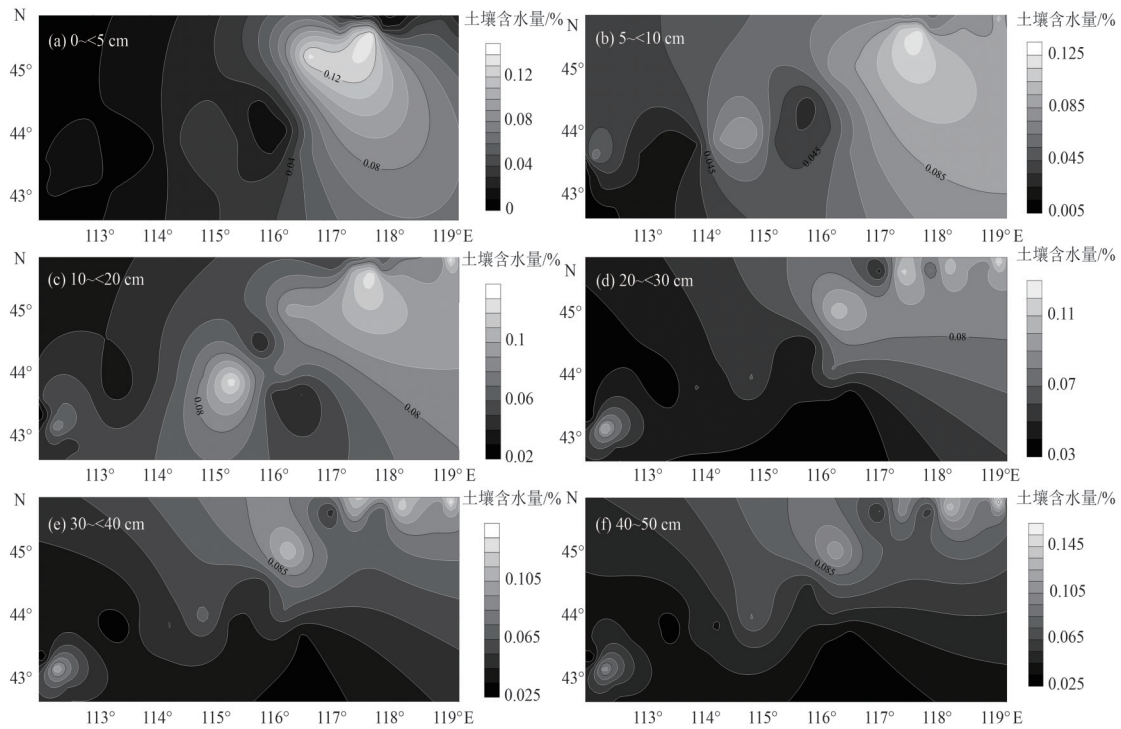


图 2 各层土壤水分含量空间分布图

Fig. 2 The spatial distribution of soil water content in each layer

不同土层土壤含盐量的空间分布如图 3 所示。由图 3 可知,土壤含盐量在 0~<5 cm 的高值区出现在典型草原,呈辐射状向外分散,含盐量逐渐降低,梯度变化明显。在 5~<20 cm 土层,土壤含盐量高值区没有变化,但是盐含量降低,梯度变缓。在 20 cm 以下土层的土壤含盐量变化幅度增大,含量增加,高值中心西移,位于典型草原与荒漠草原的过渡区域,高值中心附近等盐线分布密集,在 30 cm 以下表现尤为明显。

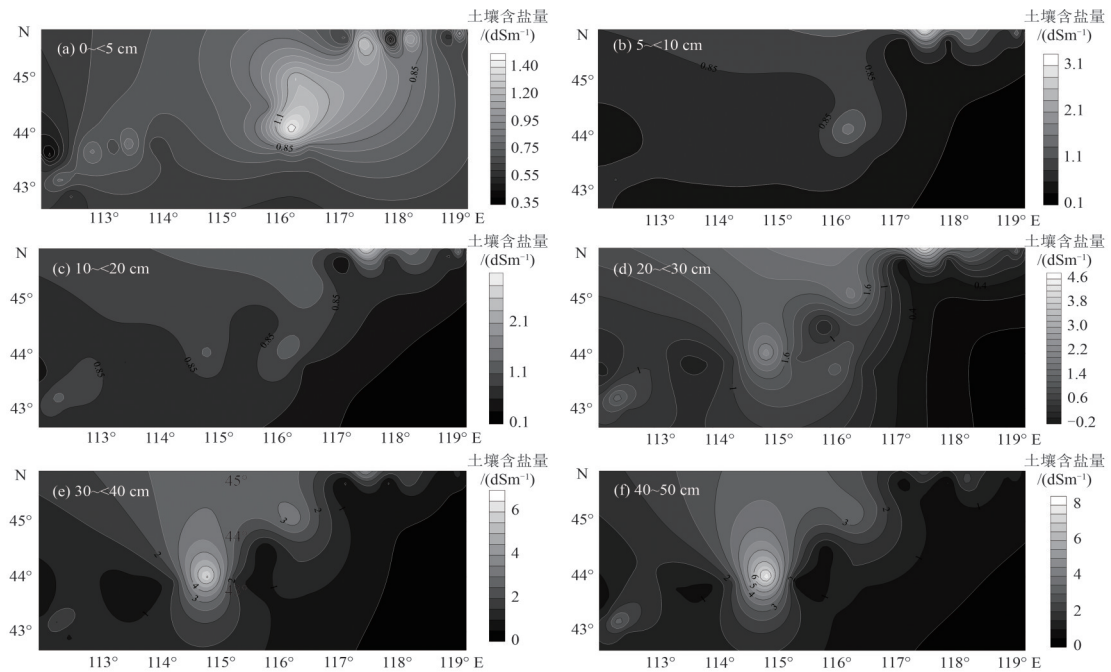


图 3 各层土壤盐分含量的空间分布图

Fig. 3 The spatial distribution of soil salt content in each layer

2.4 土壤水分与盐分含量的驱动因素分析

2.4.1 土壤水分含量影响因素分析 土壤含水量的冗余分析如图 4 所示,冗余分析中的第一排序轴与第二排序轴共解释了各影响因素对草甸草原土壤水分含量影响的 88.90%、对典型草原土壤水分含量影响的 91.41% 和对荒漠草原土壤水分含量影响的 89.68%,占比较大,可以解释其对土壤水分含量的作用大小。

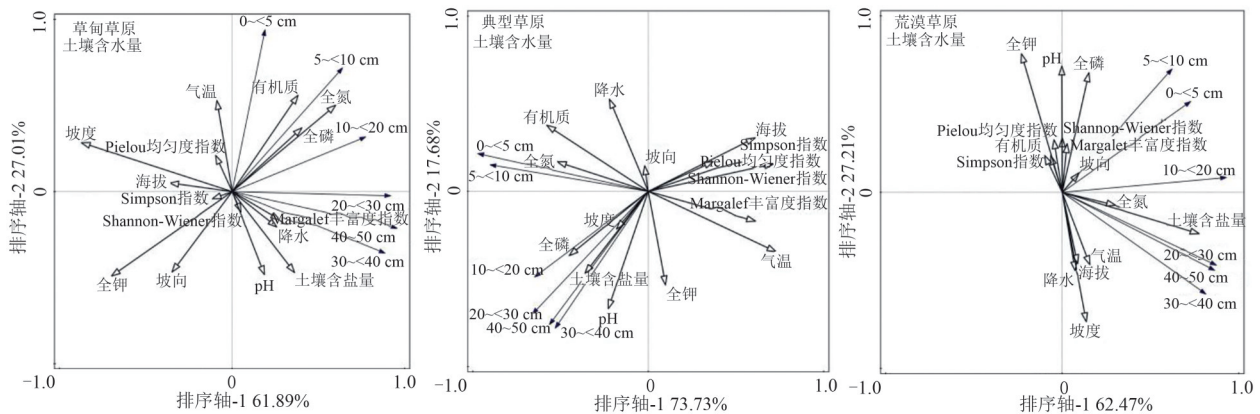


图 4 不同土层土壤含水量冗余分析图

Fig. 4 The redundancy analysis of soil salt content at different soil depths

在草甸草原,0~50 cm 内土壤含水量与土壤有机质、全氮、全磷均呈正相关,说明土壤有机质、全氮和全磷会影响土壤含水量,不同土层中的水分会影响 C、N、P 等微量元素的分配和驻留,进而影响土壤含水量。土壤含水量均与土壤全钾、坡向、Simpson 指数呈负相关。其中 5~<10 cm 的土壤含水量与土壤有机质、全氮、全磷呈显著正相关($P<0.05$),与坡向呈显著负相关($P<0.05$);在 40~50 cm 中,坡度与土壤含水量呈显著负相关($P<0.05$)。土壤含盐量对土壤含水量的影响主要集中在 30 cm 以下土层,其原因为盐分会影响土壤水分的蒸发和下渗。

在典型草原,0~50 cm 土壤含水量与土壤含盐量、坡度、全磷、全氮等指标呈正相关,与海拔、气温、Pielou 均匀度指数、Simpson 指数、Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 指数呈负相关。其中 10~<20 cm 土壤含水量与全磷呈显著正相关($P<0.05$)。土壤含盐量、坡度与 20 cm 以下的土壤含水量呈显著正相关($P<0.05$)。

在荒漠草原,0~50 cm 土壤含水量均与坡向、全氮、土壤含盐量等呈正相关,与 Simpson 指数呈负相关。其中在 5~<10 cm 土壤含水量与坡向呈显著正相关($P<0.05$)。

2.4.2 土壤含盐量影响因素分析 土壤含盐量的冗余分析如图 5 所示,第一排序轴和第二排序轴共解释了各草原类型各影响因素对土壤含盐量作用的 98.95%、98.61% 和 96.45%,占比较大,可以反映土壤含盐量的主要影响因子。

在草甸草原,0~50 cm 的土壤含盐量与土壤含水量、pH 值、坡向呈正相关,与降水、坡度、黏土、Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数、Margalef 丰富度指数和 Pielou 均匀度指数呈负相关。其中 0~<5 cm 的土壤含盐量与坡度呈显著负相关($P<0.05$);10~<20 cm 土层的土壤含盐量与 pH 值呈显著正相关($P<0.05$);40~50 cm 土层的土壤含盐量与 Pielou 均匀度指数呈显著负相关($P<0.05$)。

在典型草原,0~50 cm 的土壤含盐量与土壤含水量、全磷、坡度、pH 值呈正相关,与 Margalef 丰富度指数、海拔呈负相关。其中 10~<20 cm 的土壤含盐量与土壤含水量呈显著正相关($P<0.05$);20~<30 cm 土层的土壤 pH 值和坡度与土壤含盐量呈显著正相关($P<0.05$)。

在荒漠草原,0~50 cm 各层土壤含盐量均与全氮、海拔、土壤含水量、Margalef 丰富度指数、坡度、坡向、全磷具有正相关性,均与全钾具有负相关性。其中 0~<5 cm 土层的土壤含盐量与土壤含水量

呈显著正相关($P < 0.05$); 10~<20 cm 土层的土壤含盐量与 Margalef 丰富度指数呈显著正相关($P < 0.05$); 30~<40 cm 土层的土壤含盐量与全钾呈显著负相关($P < 0.05$)。

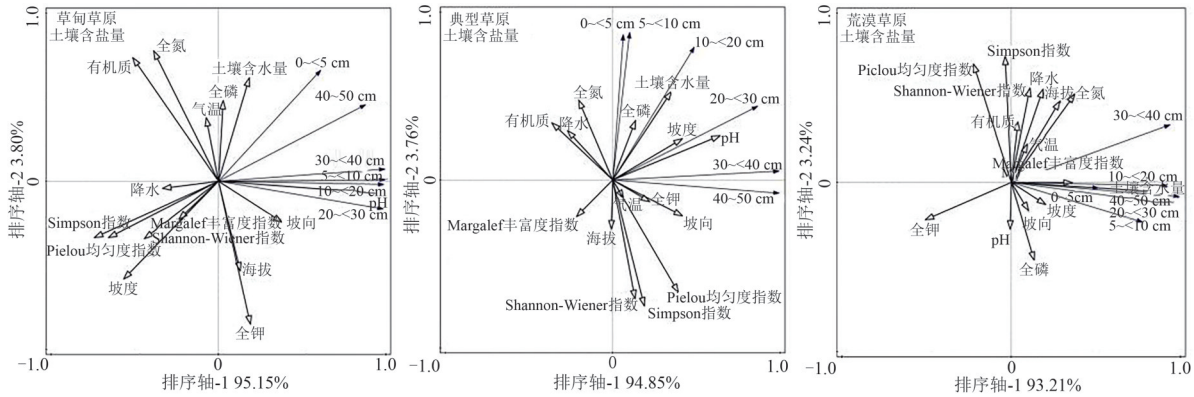


图 5 不同土层土壤含盐量冗余分析图

Fig. 5 The redundancy analysis of soil water content at different soil depths

3 讨论

3.1 不同土层深度水分和盐分含量的空间变化特征

本研究发现,各层土壤含水量在空间分布上有所差异。土壤含水量变化可分为三个主要层次:在 0~<5cm, 高值点与低值点变化明显;在 5~20 cm 土壤水分含量变化相近;在 20 cm 以下,高值点与低值点变化趋势相同,且随着土层深度的增加趋于稳定^[22]。这主要是由于锡林郭勒草原在 20 cm 以下多出现钙积层,土壤钙化严重,影响了土壤水分的垂直运移规律。这与何秀珍等^[23]的研究结果相一致。

土壤含盐量的变化与土壤含水量的变化有着共性和联系,土壤含盐量的变化大致分为三个层次:在 0~<5 cm,土壤含盐量变化由高值点向外围扩散,且高值点区域与同土层含水量高值点区域距离相近,说明土壤中的水分是土壤水溶性盐迁移的重要介质,表现为盐随水走的特点;在 5~20 cm,含盐量随着深度的增加高值点增多且向荒漠草原移动;在 20 cm 以下,含盐量随着土层深度的增加基本呈增加的趋势。

3.2 影响各草原类型土壤水分和盐分含量的因素

土壤水分和盐分含量在各草原类型中均表现出密切的正相关关系。说明水分和盐分之间相互影响,相互促进。

在养分因子中,土壤有机质、全氮、全磷仅对三种草原中 20 cm 以内的土壤含水量具有促进作用。随着深度的增加,影响逐渐减弱。土壤养分之间的循环会影响植物层水分的活跃程度,进而可以提升土壤的保水能力。全磷与典型草原和荒漠草原各层土壤含盐量均具有正相关关系,表明土壤中磷的变化对土壤水溶性盐具有关键作用,这与窦旭等^[24]的研究结果相一致。

土壤 pH 值对于土壤水分和盐分含量具有重要作用。在草甸草原和典型草原中,pH 值分别与 30 cm 以下的土壤含水量和 0~50 cm 的土壤含盐量具有正相关关系,表明土壤 pH 值是影响 30 cm 以下土层深度土壤水盐含量的重要因子,这与 Liu 等^[25]的研究结果相一致。在荒漠草原,土壤 pH 值对土壤含水量和含盐量的影响有所减弱,这主要是由于荒漠草原土壤水分和盐分含量总体偏小,差异不明显。

4 结论

(1)土壤含水量除 0~<5 cm 土层呈典型草原> 草甸草原> 荒漠草原外,5~50 cm 土层含水量均表现为草甸草原最高,典型草原次之,在荒漠草原含量最低。三种草原类型 30~50 cm 土壤含盐量大

于 0~10 cm 土壤含盐量。0~<40 cm 荒漠草原土壤盐渍化程度低于草甸草原和典型草原,而在 40~50 cm,则呈相反的变化特点。三种草原类型的土壤水盐含量均属中等程度的变异。

(2)0~<5 cm 土层土壤含水量受结构性因素和随机性因素的共同作用,5~50 cm 土层含水量主要受结构性因素影响。土壤含盐量除 20~<30 cm 受结构性因素和随机性因素的共同作用外,其余土层含盐量主要受结构性因素影响。

(3)在三种草原类型中,土壤各层含水量均与土壤全氮呈正相关,均与 Simpson 指数呈负相关。草甸草原和典型草原各层土壤含水量均与土壤全磷具有正相关关系。草甸草原和典型草原各层含盐量均与土壤 pH 值呈正相关。三种草原类型的各层含盐量均与土壤含水量具有正相关关系,尤其在荒漠草原各层土壤水盐含量有着共性变化且相互影响。其余指标对各草原类型各土层土壤水分和盐分含量的影响有所不同。

参考文献:

- [1] 朱珠,马洁,孙三民,等. 滴灌条件下枣树根区土壤水盐变化初探[J]. 节水灌溉, 2010(10): 35-39.
- [2] 郭勇,尹鑫卫,李彦,等. 农田-防护林-荒漠复合系统土壤水盐运移规律及耦合模型建立[J]. 农业工程学报, 2019, 35(17): 87-101.
- [3] 张谦,祁虹,冯国艺,等. 滨海盐碱地棉田土壤水盐动态变化规律及对棉花生长发育影响[J]. 河北农业大学学报, 2014, 37(1): 6-10.
- [4] 张晓龙,周继华,来利明,等. 黑河典型荒漠植被区土壤水盐和养分沿降水梯度的变化特征[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26(6): 1369-1375.
- [5] 马风云,李新荣,张景光,等. 沙坡头人工固沙植被土壤水分空间异质性[J]. 应用生态学报, 2006, 17(5): 789-795.
- [6] GHORBANI A, MOGHADDAM S M, MAJD K H, et al. Spatial variation analysis of soil properties using spatial statistics: A case study in the region of Sabalan mountain, Iran[J]. Eco Mont (Journal on Protected Mountain Areas Research), 2018, 10(1): 70-80.
- [7] 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.
- [8] 黄晔,王雪梅. 干旱区典型植物群落土壤水盐空间差异[J]. 水土保持研究, 2018, 25(2): 126-130.
- [9] 张霞,沈炳岗,王亚萍,等. 基于灰色关联分析的土壤水盐动态变化研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(4): 267-270.
- [10] 葛广华,殷彩云,王家强,等. 塔里木河上游荒漠河岸林土壤水盐分布规律研究[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(6): 7-12.
- [11] 陈银磊,程建军,马仲民. 克拉玛依农业综合开发区土壤水盐运移特征与影响因素的分析[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2016, 34(2): 222-231.
- [12] 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.
- [13] 李晋波,姚楠,赵英,等. 不同放牧条件下锡林郭勒典型草原土壤水分分布特征及降水入渗估算[J]. 植物生态学报, 2018, 42(10): 1033-1042.
- [14] 谢静,关文彬,崔国发,等. 锡林郭勒草原不同植被类型的土壤水分特性[J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(1): 45-48.
- [15] 李想,于红博,刘月璇,等. 锡林郭勒不同草原类型群落生物量及多样性研究[J]. 草地学报, 2022, 30(1): 196-204.
- [16] 李璐霞. 岔口小流域淤地坝建设的盐碱化效应研究[D]. 太谷: 山西农业大学, 2019.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [18] 孙英君,王劲峰,柏延臣. 地统计学方法进展研究[J]. 地球科学进展, 2004, 19(2): 268-274.
- [19] 王蕾,王艳玲,李欢,等. 长期施肥下红壤旱地磷素有效性影响因子的冗余分析[J]. 中国土壤与肥料, 2021(1): 17-25.
- [20] 戴军杰,章新平,吕殿青,等. 南方红壤丘陵区樟树林土壤水分动态变化[J]. 水土保持研究, 2019, 26(4): 123-131.
- [21] 王遵亲. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 1-2.
- [22] THOMEY M L, COLLINS S L, VARGAS R, et al. Effect of precipitation variability on net primary production and soil respiration in a Chihuahuan Desert grassland[J]. Global Change Biology, 2011, 17(4): 1505-1515.
- [23] 何秀珍,宋乃平,刘孝勇,等. 荒漠草原区不同类型草地土壤水分特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(4): 117-122.
- [24] 窦旭,史海滨,李瑞平,等. 盐渍化土壤剖面盐分与养分分布特征及盐分迁移估算[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1):

279–290.

- [25] LIU H J, LI Y. Dynamics of soil salt and nitrogen and maize responses to nitrogen application in Hetao irrigation district, China[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2022, 22(2): 1520–1533.

Spatial Variation Characteristics and Influencing Factors of Soil Moisture and Salinity in Different Grassland Subtypes of Xilingol

CHANG Shuai^{1,2}, YU Hongbo^{1,3,4}, TANG Yanni², ZHANG Qiaofeng^{1,3}

(1. *College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China;*

2. *Future School, Kangbashi District, Erdos City, Erdos 017010, Inner Mongolia, China;*

3. *Key Laboratory of Remote Sensing and Geographic Information System, Hohhot 010022, China;*

4. *Key Laboratory of Climate Change and Regional Response on the Mongolian Plateau, Hohhot 010022, China*)

Abstract: Using methods such as descriptive statistical analysis, geostatistics, and redundancy analysis, this paper explored the changes in soil moisture and salinity content, spatial variability, and influencing factors in the meadow steppe, typical steppe, and desert steppe of Xilingol at depths of 0 to 50 cm. The research findings are as follows. (1) Soil moisture content in the 0 to <5 cm layer is ranked as typical steppe > meadow steppe > desert steppe, while for the other soil layers, the meadow steppe has the highest moisture content and the desert steppe has the lowest. (2) In the soil layers below 30 cm, all three grassland types exhibit severe salinization levels, while in the layers above 30 cm, the grasslands are generally at moderate to severe salinization levels. Overall, the salinization of the desert steppe is lower than that of the other two types of grasslands. (3) The soil moisture content shows strong variability in all layers except for the 20 to <30 cm layer, which has moderate variability; the soil salinity exhibits strong variability in all depths except for the surface layer (0 to <5 cm), which has moderate variability. (4) High-value spots of soil moisture content show significant variability in the 0 to <20 cm layer, while they tend to stabilize in the 20 to 50 cm layer. Soil salinity exhibits noticeable changes in the 0 to <5 cm layer, decreases from 5 to <20 cm, and shows a trend of local increases with increasing soil depth below 20 cm. (5) The soil moisture content in each grassland subtype is positively correlated with total nitrogen and negatively correlated with the Simpson index. Soil salinity is positively correlated with soil moisture content, with desert steppe showing the lowest moisture content across all layers. Soil pH is the main factor influencing soil salinity in meadow and typical steppes, while total phosphorus is the primary factor affecting soil moisture content in meadow steppe. In desert steppe, soil moisture and salinity factors mutually influence each other as major contributing factors.

Key words: moisture and salinity characteristics; spatial distribution; redundancy analysis; influencing factors

【责任编辑 张颖娟】