

# 不同利用方式土地的土壤盐碱化特征差异

王晨晨, 孙向阳\*, 李素艳, 刘源鑫, 岳宗伟, 查贵超

(北京林业大学林学院, 森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083)

**摘要:**【目的】以 3 种利用方式(城市绿地、平原造林地、苗圃地)土地的土壤为研究对象, 揭示土地利用方式对土壤盐碱化特征的影响, 以期合理选择造林和营林类型并有效地从成因上控制土壤盐碱化趋势以及土地利用的可持续发展提供科学依据。【方法】2022 年春季在北京市通州区选取树种常见的城市绿地、平原造林地、苗圃地 54 个, 分别采集 0~20 cm、20~40 cm 土层土壤样品 324 个, 对各土层土壤全盐含量、主要阴阳离子含量及组成、碱化指标进行测定, 采用单因素方差分析、相关性分析、克里金插值法对 3 种利用方式土地的土壤盐碱特征进行分析, 并探讨其形成原因。【结果】研究区土壤总体呈碱性, 土壤 pH 在 8.39~8.53 之间, 盐化和碱化程度均为中度及以下。不同利用方式土地的土壤全盐含量、离子组成及分布存在差异, 城市绿地土壤盐分呈“表聚”型分布, 全盐量及  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  含量显著高于平原造林地和苗圃地, 研究区土壤  $\text{Na}^+$  变异系数最大,  $\text{Ca}^{2+}$  变异系数最小。除  $\text{Na}^+$  外, 其它离子在城市绿地土壤中变异系数均高于平原造林地和苗圃地。在空间分布特征上, 0~20 cm 层土壤全盐量与碱化度的状况基本一致, 研究区北部盐碱化程度较高, 且由北向南逐渐递减。【结论】研究区 3 种利用方式土地形成不同的土壤盐碱化特征。城市绿地土壤较易发生次生盐碱化, 而平原造林地和苗圃地的管理措施及枯落物返还比例可能通过改变土壤盐分含量、组成及碱化程度, 从而减缓次生盐碱化。

**关键词:** 土地利用方式; 城市绿地; 盐碱化特征; 空间分布

**中图分类号:** S156.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2023)05-1167-09

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2022111502

王晨晨, 孙向阳, 李素艳, 刘源鑫, 岳宗伟, 查贵超. 不同利用方式土地的土壤盐碱化特征差异 [J]. 土壤通报, 2023, 54(5): 1167-1175

WANG Chen-chen, SUN Xiang-yang, LI Su-yan, LIU Yuan-xin, YUE Zong-wei, ZHA Gui-chao. Soil Salinization Characteristics in Different Land Use Soils[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(5): 1167-1175

【研究意义】土壤盐碱化程度加剧是限制其利用的重要因素之一, 中国盐碱土面积约为  $9.9 \times 10^7$   $\text{hm}^2$ , 土壤盐碱化严重威胁土地可持续利用和人类粮食安全<sup>[1]</sup>。次生盐碱化是指人类不科学的对土地进行利用和管理导致盐分聚集, 次生盐碱化引起了一系列问题, 如土壤团粒结构和通气透水性变差、抑制了土壤微生物活性、降低了土壤保水保肥能力、降低了土壤氮循环和碳循环的调控功能等<sup>[2-3]</sup>。北京在平原区打造大尺度森林生态系统, 随着林木快速增长, 合理利用土地, 减少土壤次生盐碱化来提升土壤质量、改善林木生长环境, 对改进平原造林和科学规划绿化空间具有重要意义。

【前人研究进展】不同利用方式土地的植被类型和人为干预程度不同, 其通过影响地表凋落物含量、气候、微生物活动和丰度以及水文条件等改变

土壤环境, 是影响土壤次生盐碱化及生态功能的重要原因<sup>[4-8]</sup>。华北平原地区土壤次生盐碱化是农业生产亟待解决的问题之一, 郭永龙等<sup>[9]</sup>对华北地区不同利用方式土地的土壤脱盐趋势研究表明, 农林耕作和小气候使耕地脱盐水平高于灌草丛, 此外, 农田土地集约化种植也会通过改变土壤碱化程度影响华北平原地区的土壤碳酸盐动态<sup>[10]</sup>; 景宇鹏等<sup>[11]</sup>研究发现不同土地利用方式导致全盐量随土层深度变化呈现不同趋势, 农用地的人为经营管理措施改变了盐分表聚现象, 促进了盐分离子的下行; 王雪梅等<sup>[12]</sup>通过对盐碱化特征研究发现, 不同利用方式土地的植被覆盖程度通过影响地表蒸发效率改变了盐离子分布, 荒漠灌丛和盐碱草地对盐分的富集能力明显强于耕地和林地; 张俊达等<sup>[13]</sup>对北京市绿地土壤研究发现街旁绿地由于建筑活动、外源物入侵等原

收稿日期: 2022-11-15; 修订日期: 2022-12-21

基金项目: 高精度数字森林土壤数据库构建(2021FY100802)资助

作者简介: 王晨晨(1997-), 女, 辽宁阜新, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤生态。E-mail: 1763955906@qq.com

\*通讯作者: E-mail: sunxy@bjfu.edu.cn

因使土壤 pH 显著高于公园绿地。值得注意的是,人类对土地的不同利用和管理方式是造成土壤次生盐碱化和影响盐分离子组成的关键,因此进行农林布局时应结合当地特点进行种植调整。

**【本研究切入点】**近年来,为提升国家森林城市生态系统碳汇增量,营造近自然生态环境和绿色生态产业,城市绿地、平原造林地、苗圃地面积逐步扩增,探究其土壤盐碱化特征,合理改良土壤不仅是实现土壤高效可持续利用的前提,而且是保护生态环境的基础。

**【拟解决的问题】**分析华北平原地区不同利用方式土地的土壤盐碱化特征,找出这些土壤盐碱化的共性和差异。为此,对比了 3 种不同利用方式(城市绿地、平原造林地、苗圃地)土地的土壤全盐量、pH、碱化度、主要离子含量及分布特征并分析了形成原因,其结果可为相似地区土地资源的可持续利用与生态环境的管理提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

研究区位于北京市通州区(39°46′~40°02′N, 116°32′~116°56′E),处于京杭大运河最北端,海拔高程在 8.2 m~27.6 m, 坡降 0.3‰~0.6‰, 局部地区略有起伏,属暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均气温 17.4 ℃, 年均降水量 620.9 mm, 蒸发量 1895 mm, 降水集中, 季节分配不均, 常年发生春旱夏涝, 光照充足, 热量丰富。通州区属海河流域, 其水系分潮白河和北运河两个水系, 有大小河流 13 条, 主要河道多为西北、东南走向。植被类型为暖温带落叶阔叶林, 全区森林面积约 187.6 km<sup>2</sup>。

北京市通州区面积约 907 km<sup>2</sup>, 土壤类型主要为潮黄土。试验选取区域内城市绿地、平原造林地和苗圃地三种利用方式土地的土壤, 城市绿地表层(0~20 cm)土壤为容重 1.53 g cm<sup>-3</sup>、有机质 14.7 g kg<sup>-1</sup>、碱解氮 50.5 mg kg<sup>-1</sup>、有效磷 18.3 mg kg<sup>-1</sup>、速效钾 143.5 mg kg<sup>-1</sup>, 植被包含紫叶李(*Prunus cerasifera* f. *atropurpurea*)、碧桃(*Prunus persica* f. *duplex*)等;平原造林地表层土壤容重 1.50 g cm<sup>-3</sup>、有机质 15.9 g kg<sup>-1</sup>、碱解氮 56.9 mg kg<sup>-1</sup>、有效磷 21.6 mg kg<sup>-1</sup>、速效钾 126.8 mg kg<sup>-1</sup>, 植被包含国槐(*Sophora japonica*)、白蜡(*Fraxinus chinensis*)、碧桃等;苗圃地表层土壤容重 1.46 g cm<sup>-3</sup>、有机质

18.4 g kg<sup>-1</sup>、碱解氮 66.6 mg kg<sup>-1</sup>、有效磷 39.4 mg kg<sup>-1</sup>、速效钾 130.9 mg kg<sup>-1</sup>, 植被包含海棠(*Malus* spp.)、紫叶李、油松(*Pinus tabulaeformis*)等。

从林木种植情况来看,城市绿地平均栽植密度为 855 株 hm<sup>-2</sup>, 平原造林地平均栽植密度为 630 株 hm<sup>-2</sup>, 苗圃地平均栽植密度为 1125 株 hm<sup>-2</sup>。从水分管理来看,城市绿地和平原造林地在高温季节除自然降水外辅以定期灌溉,苗圃地为自然降水和人工灌溉结合。从施肥措施来看城市绿地和平原造林地以化肥为主,苗圃地以有机肥为主,配合施用复合肥、尿素、磷酸二铵。苗圃地树龄约为 5 a, 城市绿地和平原造林地树龄约为 7 a。

### 1.2 土壤样品采集

野外土壤样品的采集时间为 2022 年 4 月,为确保样品的代表性,提前确定采样地并规划路线,于野外进行 GPS 定位,基于定位样地具体位置,根据等量、随机的原则进行采样(图 1)。在收集和整理研究区域土地规划格局相关资料的基础上,利用 ArcGIS Pro 的创建随机点工具在约束要素类里分别设置约束条件为通州区的城市绿地、平原造林地、苗圃地,按照土壤类型及土地利用方式确定取样数,选取土地基础条件基本相同的 54 个样地。在样地确定 1 个取样点后,周围辐射约 10 m 处另选 2 个点,呈任意三角形形状采样<sup>[2]</sup>,共 162 个样点,其中城市绿地、平原林地、苗圃分别为 30 个、57 个和 75 个取样点;取两层,得 324 个土样。采样结束后装入自封袋密封保存,去除植物残体及侵入体,经风干、研磨后过 2 mm 和 0.15 mm 筛,保存待测。

### 1.3 测定项目及方法

土壤 pH 采用电位法测定(土水比 1:2.5);可溶性盐分离子含量采用土水比 1:5 浸提的方法测定, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>和 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>含量采用双指示剂中和滴定法测定, Cl<sup>-</sup>含量采用硝酸银滴定法测定, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Ca<sup>2+</sup>和 Mg<sup>2+</sup>含量采用 EDTA 间接滴定法测定, Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>含量采用火焰光度计法测定, 阳离子交换量采用乙酸钠浸提火焰光度计法测定, 土壤交换性钠离子采用乙酸铵浸提火焰光度计法测定。

### 1.4 数据处理

实验数据 SPSS 20.0 和 Excel 2020 进行描述性统计分析和制图制表,使用 SigmaPlot 10.0 进行绘图,采用 ArcGIS 和 Kriging 法进行空间插值。

使用等式(1)和(2)计算土壤全盐量(S,

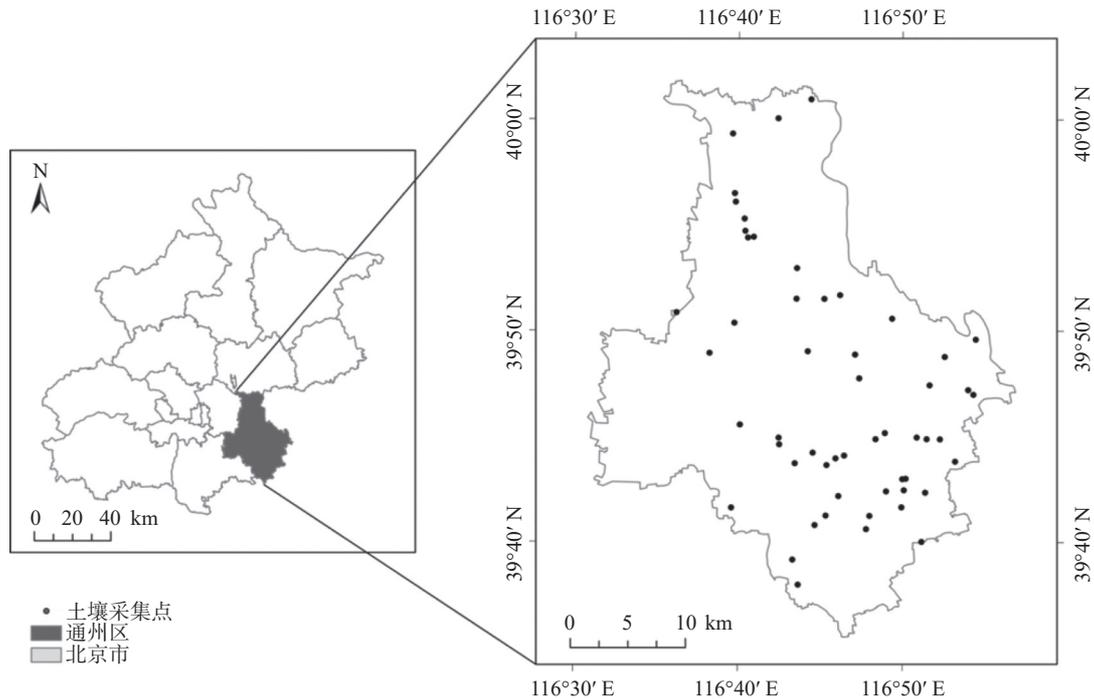


图1 研究区及样点分布示意图

Fig.1 Location and distribution map of soil samples in the study area

$\text{mg kg}^{-1}$ ) 和碱化度 (ESP, % )。

$$S = W_{\text{CO}_3^{2-}} + W_{\text{HCO}_3^-} + W_{\text{SO}_4^{2-}} + W_{\text{Cl}^-} + W_{\text{Mg}^{2+}} + W_{\text{Ca}^{2+}} + W_{\text{Na}^+} + W_{\text{K}^+} \quad (1)$$

$$\text{ESP} = E_{\text{Na}^+} / \text{CEC} \times 100 \quad (2)$$

其中 W 代表质量分数 ( $\text{g kg}^{-1}$ )、 $E_{\text{Na}^+}$  和 CEC 分别代表交换性钠离子含量和阳离子交换量 ( $\text{cmol kg}^{-1}$ )。

土壤盐碱化分级分类标准见参考文献<sup>[14-15]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤盐碱化特征描述分析

土壤全盐量、酸碱度、碱化度能反映土壤的盐碱化状况。对不同利用方式土地土壤的盐碱特征值进行统计分析, 结果如表 1 所示。研究区城市绿地土壤 pH 介于 8.39 ~ 8.49, 平原造林地土壤 pH 介于 8.51 ~ 8.53, 苗圃地土壤 pH 介于 8.48 ~ 8.50, 总体呈碱性。研究区城市绿地土壤交换性钠含量介于 0.83 ~ 0.96  $\text{cmol kg}^{-1}$ , 平原造林地土壤交换性钠含量介于 1.67 ~ 1.69  $\text{cmol kg}^{-1}$ , 苗圃地土壤交换性钠含量介于 1.92 ~ 2.29  $\text{cmol kg}^{-1}$ 。城市绿地、平原造林地、苗圃地 0 ~ 20 cm 土层的平均碱化度分别为 12.56%、11.83%、11.40%, 20 ~ 40 cm 土层的平均碱化度分别为 10.17%、11.78%、12.80%, 碱化度与 pH 呈现相似的变化趋势。研究区土壤全盐量介于 0.63 ~ 2.54

$\text{g kg}^{-1}$ , 城市绿地土壤全盐量介于 0.79 ~ 2.54  $\text{g kg}^{-1}$ , 平原造林地土壤全盐量介于 0.63 ~ 1.65  $\text{g kg}^{-1}$ , 苗圃地土壤全盐量介于 0.75 ~ 1.94  $\text{g kg}^{-1}$ 。变异系数是反映变量离散程度的重要指标, 能在一定程度上反映土壤盐分量的空间变异特征。研究区土壤全盐量的变异系数介于 14.70% ~ 38.09%, 根据变异系数的分级<sup>[16]</sup>, 不同利用方式土地的土壤全盐量均属于中等强度变异, 说明土壤全盐量具有较强的空间异质性, 分布不均匀。

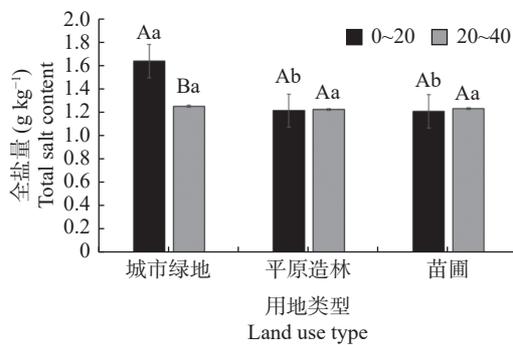
### 2.2 土壤盐分离子的分布特征

对不同利用方式土地的不同土层土壤全盐量进行对比, 如图 2 所示, 土壤全盐量在不同利用方式土地的土壤中分布特征不同。分别从 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层对比不同利用方式土地土壤的全盐量, 城市绿地 0 ~ 20 cm 土层土壤全盐量显著高于平原造林地和苗圃地, 20 ~ 40 cm 土层土壤全盐量在不同利用方式土地间没有显著差异。从剖面垂直方向看, 城市绿地 0 ~ 20 cm 土层土壤全盐量显著高于 20 ~ 40 cm 土层, 盐分呈表聚积累, 平原造林地和苗圃地 0 ~ 20 cm 土层土壤全盐量略低于 20 ~ 40 cm 土层, 差异不显著。

从盐分离子分布情况来看 (图 3), 不同利用方式土地土壤的主要盐分离子组成相同, 阴离子均以  $\text{HCO}_3^-$  为主, 占阴离子总量的 38% ~ 45%, 其次是

表 1 土壤盐碱含量统计值  
Table 1 Statistical values of soil salinity content

土地类型 Soil type	土层深度 Soil layer (cm)	pH	交换性钠离子 Exchangeable Na <sup>+</sup> (cmol kg <sup>-1</sup> )	碱化度 ESP (%)	全盐含量 Salt content				
					最大值 Maximum (g kg <sup>-1</sup> )	最小值 Minimum (g kg <sup>-1</sup> )	平均值 Average (g kg <sup>-1</sup> )	标准差 Standard deviation (g kg <sup>-1</sup> )	变异系数 Coefficient of variation (%)
城市绿地	0~20	8.49	2.52	12.56	2.1	1.33	1.64	0.24	14.70
	20~40	8.39	2.06	10.17	2.54	0.79	1.25	0.48	38.09
平原造林地	0~20	8.51	1.67	11.83	1.65	0.83	1.22	0.25	20.49
	20~40	8.53	1.69	11.78	1.63	0.63	1.22	0.25	20.13
苗圃地	0~20	8.48	1.92	11.40	1.94	0.75	1.21	0.28	23.47
	20~40	8.50	2.29	12.80	1.88	0.84	1.33	0.24	18.26



注:不同大写字母表示同一用地不同土层间在 0.05 水平上差异显著, 不同小写字母表示同一土层不同用地间在 0.05 水平上差异显著。

图 2 不同利用方式土地土壤全盐含量

Fig.2 Salt distributions in soil profiles in different land use types

Cl<sup>-</sup>和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>含量极少, 可忽略不计; 阳离子均以 Na<sup>+</sup>为主, 占阳离子总量的 61%~79%, 其次是 K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>和 Mg<sup>2+</sup>含量较低, 均小于 0.05 g kg<sup>-1</sup>。同一离子在不同利用方式土地土壤中分布特征不同, 城市绿地中 Cl<sup>-</sup>、Na<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>含量均显著高于平原造林地和苗圃地, 城市绿地中 K<sup>+</sup>含量低于苗圃地和平原造林地, 与苗圃地达到显著性差异。不同利用方式土地的土壤盐分离子的变异系数呈相似的变化趋势, 但变异强度有差异。不同利用方式土地的土壤

Na<sup>+</sup>变异系数接近, 除 Na<sup>+</sup>外, 城市绿地中各离子的变异强度均大于平原造林地和苗圃地, 说明城市绿地中盐分离子的空间异质性较强。平原造林地和苗圃地中 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>变异系数接近, 但远远小于城市绿地, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>代表土壤碱化程度, 说明城市绿地中的碱度变化较平原造林地和苗圃地中强, 空间分布情况较为复杂。

### 2.3 土壤盐碱化指标间的相关性

为进一步了解研究区土壤盐碱组成的关系, 明晰其在土体中存在的形态及运移方式<sup>[7]</sup>, 对土壤盐碱指标间的相关性进行了分析。结果如表 2 所示, 土壤碱化度与 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>和 Na<sup>+</sup>呈极显著正相关, 说明土壤碱化程度主要由 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>和 Na<sup>+</sup>的含量决定, 并随其含量升高而增大; 土壤全盐量除与 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>之外的其他离子均呈极显著相关, 与 Na<sup>+</sup>相关性最高, 达到 0.809, 说明 Na<sup>+</sup>含量变化是影响全盐量的主要因素; HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>与 K<sup>+</sup>呈极显著正相关关系, 与其他离子均呈极显著负相关; Cl<sup>-</sup>与 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>呈极显著正相关, 与 Ca<sup>2+</sup>相关性达到 0.730; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>与 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>呈极显著正相关, 与 Na<sup>+</sup>呈显著相关关系; Ca<sup>2+</sup>与 Mg<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>呈极显著正相关, 与 K<sup>+</sup>呈

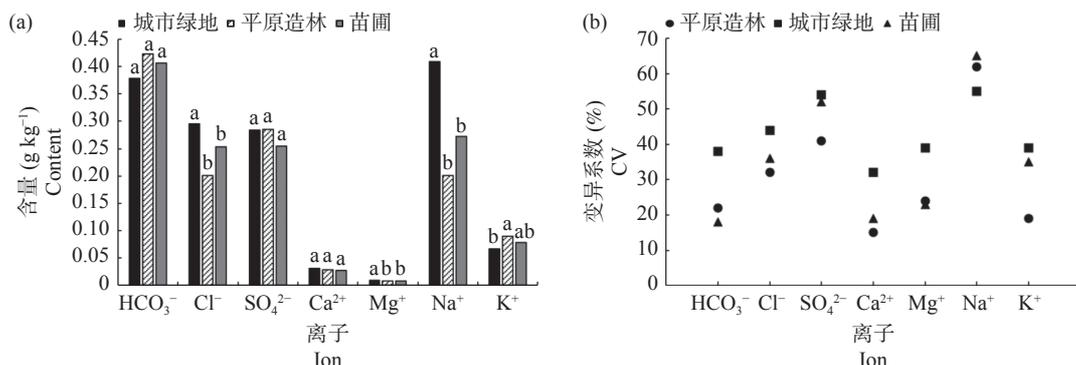


图 3 盐分离子在不同利用方式土地土壤中的分布

Fig.3 Distribution of salt ions in soils of different land use types

表 2 土壤盐碱指标间的相关性  
Table 2 Correlation analysis of soil salinity indicators

	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	全盐 Total salt content	碱化度 ESP
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1								
Cl <sup>-</sup>	-0.400**	1							
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-0.346**	0.495**	1						
Ca <sup>2+</sup>	-0.584**	0.730**	0.628**	1					
Mg <sup>2+</sup>	-0.362**	0.549**	0.532**	0.676**	1				
Na <sup>+</sup>	-0.228*	0.468**	0.242*	0.418**	0.622**	1			
K <sup>+</sup>	0.222*	-0.259**	-0.161	-0.176	-0.385**	-0.700**	1		
全盐	-0.116	0.731**	0.650**	0.610**	0.697**	0.809**	-0.516**	1	
碱化度	0.368**	-0.005	-0.077	-0.120	0.142	0.501**	-0.262**	0.386**	1

注: \*相关性在0.05水平下显著; \*\*相关性在0.01水平下显著

极显著负相关; Na<sup>+</sup>与 K<sup>+</sup>呈极显著负相关, 说明 Na<sup>+</sup>含量随着 K<sup>+</sup>含量的升高而降低。

### 2.4 土壤盐碱化空间分布特征

对土壤盐分含量和碱化度进行空间插值, 结果如图 4、图 5 所示。结合北京城市副中心绿色空间结构总体规划来看<sup>[18]</sup>, 城市绿地密集分布于通州区北部, 平原造林地和苗圃地均匀分布在通州区东部和南部, 与盐分含量在研究区分布情况一致。盐分含量由北向南呈现递减趋势, 东南部盐分含量相对较低。0~20 cm 土层土壤盐分含量大于 1.5 g kg<sup>-1</sup> 的区域集中

聚集于研究区的北部, 其他区域盐分含量相对较低, 20~40 cm 土层土壤盐分含量的分布较发散, 0~20 cm 与 20~40 cm 土层土壤盐分含量分布规律不同, 说明 0~20 cm 土层土壤盐分含量受土地利用方式影响更强烈。研究区 0~20 cm 土层土壤碱化程度由北向南呈递减趋势, 20~40 cm 土层土壤碱化区域主要集中在南部偏东。对比盐分含量和碱化度的分布可以看出, 0~20 cm 土层土壤碱化程度与盐分含量的空间分布呈现相似的变化规律, 且与土地利用方式变化趋势一致。

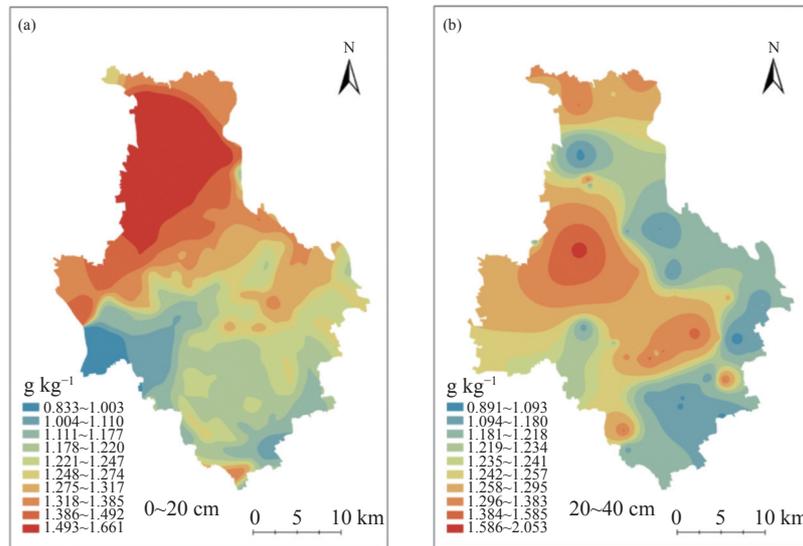


图 4 土壤盐分含量的 Kriging 插值图  
Fig.4 Kriging interpolation distribution map of salt content

根据不同利用方式土地的土壤盐碱含量, 对研究区土壤盐化、碱化、盐分组成类型进行划分, 结果如表 3 所示。总体来看, 研究区土壤盐渍化程度处于中度 (Salt < 4) 及以下, 城市绿地较平原造林地、苗圃地略高; 从土壤碱化度的情况来看, 城市

绿地有 5% 面积的非碱化土, 苗圃地有 2% 面积的重度碱化土, 研究区其他土地土壤的碱化程度介于 5%~20% 之间, 说明该区域土壤主要属于轻度至中度碱化土壤; 不同利用方式土地的土壤盐分组成类型不是单一的, 苏打盐渍土、硫酸盐—氯化物盐渍土、

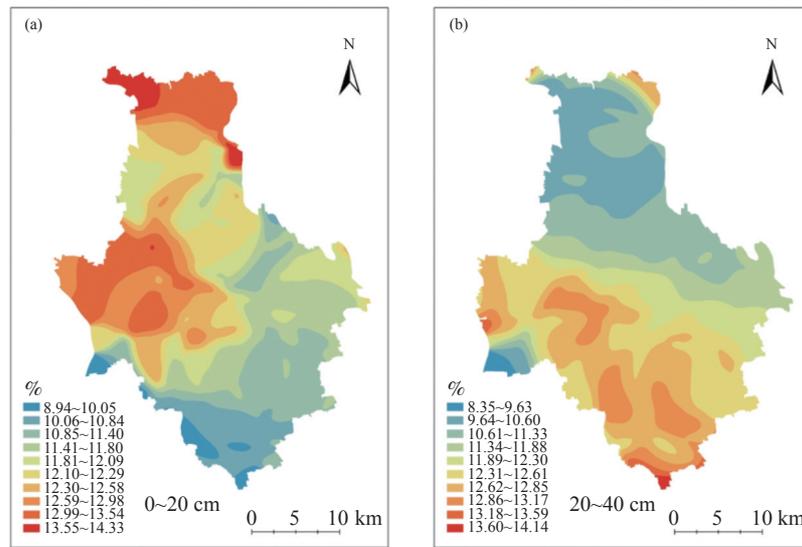


图 5 土壤碱化度的 Kriging 插值图

Fig.5 Kriging interpolation distribution map of exchangeable sodium percentage

表 3 盐化、碱化、盐渍土盐分组成类型面积占比

Table 3 Soil areal proportions of different salinization levels, alkalization levels, and salt composition types of saline soil (%)

盐化程度 Salinization level	城市绿地 Urban green space	平原造林地 Plain afforestation	苗圃地 Nursery	碱化程度 Alkalization level	城市绿地 Urban green space	平原造林地 Plain afforestation	苗圃地 Nursery	盐渍土盐分组成类型 Salt composition type	城市绿地 Urban green space	平原造林地 Plain afforestation	苗圃地 Nursery
非盐渍土	15	18	18	非碱化土	5	0	0	苏打盐渍土	30	26	42
轻度盐渍土	75	82	82	轻度碱化土	20	11	20	氯化物盐渍土	0	0	0
中度盐渍土	10	0	0	中度碱化土	75	89	78	硫酸盐—氯化物盐渍土	40	37	26
重度盐渍土	0	0	0	重度碱化土	0	0	2	氯化物—硫酸盐盐渍土	30	37	32
盐土	0	0	0	碱土	0	0	0	硫酸盐盐渍土	0	0	0

氯化物—硫酸盐盐渍土并存。

### 3 讨论

不同利用方式对土壤的干扰程度不同，导致土壤盐碱特征明显变化，土壤生态环境在其影响下朝不同方向演变<sup>[19]</sup>。本文通过对华北平原地区土壤盐碱特征分析发现，不同利用方式土地的土壤盐碱之间存在自相关或恒定的变异。

不同利用方式土地土壤盐碱含量和分布不同。城市绿地 0~20 cm 土层土壤盐分含量显著高于 20~40 cm 土层，主要是由于城市绿地土壤紧实、容重大、通透性和排水性差<sup>[20]</sup>，导致雨水以蒸发为主而下渗较少，盐分在表层积累，人为干扰驱动城市绿地土壤发生次生盐碱化，这与 M6nok 等<sup>[21]</sup>、Nero 等<sup>[22]</sup> 人的研究结果一致。前人研究表明，在夏季和秋季，北京通州区西北部的建成区地表温度明显高于其他林地和农田区域，总体呈现片状和零星热岛共存的分布特征，这是城市绿地 0~20 cm 土层土壤盐分含量显著高于平原造林地和苗圃地的原因之一<sup>[23]</sup>。城市

绿地因其生态系统服务功能及美观性的需要，地表枯枝落叶被带走，植被覆盖减少，一方面太阳辐射引起地表风速和温度升高，当地下水作为唯一水源时，温度梯度促使盐离子在毛细管作用下随水流上行、浓缩积累在地表而导致盐分负荷率增加<sup>[24-25]</sup>，另一方面养分不能以植物残体的形式归还于土壤导致土壤养分含量下降<sup>[26-27]</sup>，阳离子交换量降低促使城市绿地土壤发生盐碱化。研究区平原造林地为多层群落结构的人工生态林，无较大林窗，树冠指数在 0.7 左右，凋落物返还比例相对较高，土壤性质较城市绿地更接近自然土壤，有机质矿化作用较快，土壤结构与盐分运动较稳定<sup>[28-29]</sup>，所以，盐分没有表聚现象。苗圃地 0~20 cm 土层土壤盐分含量略低，一方面灌溉措施促进水溶性 Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup> 向下迁移，降低了钠吸附率 (SAR)、钾吸附率 (PAR) 和电导率，不仅促进了表层土壤盐分的淋溶，而且降低了表层土壤的碱化度<sup>[30-31]</sup>；苗圃地施用有机肥也是土壤盐分含量略低的原因之一，相关研究表明，施用有机肥可以直接增加有机质、腐殖质等重要的胶结物质，

加速土壤由微团聚体向大团聚体团聚, 增加土壤总孔隙度和饱和导水率, 有利于盐分淋洗<sup>[32-34]</sup>。

不同利用方式土地的土壤盐分组成存在差异。本研究表明, 城市绿地土壤中  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  含量显著高于平原造林地和苗圃地, 这主要是因为城市绿地附近的交通量更大, 除冰盐应用较多, Equiza 等<sup>[35]</sup> 从时间和空间水平确定了城市绿地土壤盐分的主要驱动因素是交通量和速度、降雪频率和强度以及风速和风向, 城市绿地土壤中  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  在使用氯化物除冰盐后通过融雪入渗、地表径流等方式积累, 并随年份增加。平原造林地和苗圃地的  $\text{K}^+$  含量显著高于城市绿地, 这可能因为  $\text{Na}^+$  和  $\text{K}^+$  物理化学性质相近, 二者存在拮抗作用, 当城市绿地土壤中  $\text{Na}^+$  含量较高时, 抑制了粘土矿物中  $\text{K}^+$  的释放, 减少了土壤中  $\text{K}^+$  的积累<sup>[36]</sup>; 平原造林地和苗圃地的  $\text{Mg}^{2+}$  含量显著低于城市绿地,  $\text{K}^+$  由于伊利石的存在, 土壤吸附的亲和力较  $\text{Mg}^{2+}$  强, 所以当土壤中  $\text{K}^+$  较高时, 对土壤胶体上交换性  $\text{Mg}^{2+}$  解吸的抑制作用较  $\text{Na}^+$  更强烈<sup>[37]</sup>。研究区水溶性  $\text{Ca}^{2+}$  含量整体偏低, 经调查与查阅资料发现研究区偏干旱且母质富含碳酸盐<sup>[38]</sup>, 剖面中有程度不一的石灰反应,  $\text{Ca}^{2+}$  多以碳酸钙的形式存在。通过各盐分离子的变异系数可以看出,  $\text{Na}^+$  的运动最为活跃,  $\text{Ca}^{2+}$  较稳定, 研究区受季节性降水及潮白河、北运河、永定河等大小河流的影响,  $\text{Na}^+$  水化半径小, 不易被土壤胶体吸附, 随水分运动能力强, 而  $\text{Ca}^{2+}$  属于二价阳离子, 在偏碱性条件下易淀积, 随水移动能力较弱, 这与康满萍等<sup>[39]</sup> 研究结果一致。

土壤中盐分离子组成关系到土壤盐碱化类型, 不同离子与土壤盐碱状况相关性不同, 根据相关性分析得到与全盐量、碱化度相关性最高的离子, 可以了解盐分在土壤中的存在形态与积累特点<sup>[40-41]</sup>。结果表明,  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  与全盐量均呈极显著正相关, 说明其浓度决定土壤盐分的积盐强度, 但不同离子对盐分含量的贡献率不同, 阳离子中  $\text{Na}^+$ 、阴离子中  $\text{Cl}^-$  与全盐量相关性最大, 是盐分的主控因子。碱化度与  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、全盐量呈极显著正相关, 说明  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Na}^+$  是促进土壤碱化的主控因子, 而且盐化与碱化关系密切。

不同利用方式土地的土壤盐碱化形成原因比较复杂, 首先应了解盐碱化形成的条件, 调整植被物种和结构, 如采用乔 + 灌 + 草的多层次配置方式,

膜下滴灌等措施降低土壤盐分含量; 对于盐分含量低而碱化程度高的地区, 建议通过施用有机肥等措施改善土壤质地和保水保肥能力; 其次, 通过施用钾肥增加钾的积累, 可以降低  $\text{Na}^+$  和  $\text{Cl}^-$  的单离子毒害作用, 提高林木产量, 以及通过叶面施用钙镁肥来缓解碱化地区植物的缺素现象。

## 4 结论

研究区土壤总体呈碱性, 盐碱化程度在中度及以下。全盐量的变异系数在 10% ~ 100%, 属于中等强度变异, 空间变化特征较明显。

不同利用方式土地的土壤全盐量分布特征不同, 城市绿地呈表聚型, 且 0 ~ 20 cm 土层土壤全盐量显著高于平原造林地和苗圃地; 对比不同利用方式土地的土壤离子组成可以看出, 城市绿地土壤中  $\text{Na}^+$  和  $\text{Cl}^-$  含量显著高于平原造林地和苗圃地; 对比各离子的空间变异性可以看出,  $\text{Na}^+$  的空间变异性最大。

土壤全盐量与碱化度、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  呈极显著正相关; 土壤碱化度与  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Na}^+$  呈极显著正相关; 土壤盐化与碱化关系密切。

土壤全盐量与碱化度在 0 ~ 20 cm 土层空间分布规律基本一致, 盐化和碱化程度北部高、南部低, 代表土壤盐化的同时存在碱化。研究结果可为土地可持续利用、调整种植结构、调控地下水盐分布及盐碱化防治提供参考。

## 参考文献:

- [1] 高惠敏, 王相平, 屈忠义, 等. 不同改良剂对河套灌区土壤盐碱指标及作物产量的影响研究[J]. 土壤通报, 2020, 51(5): 1172 - 1179.
- [2] 刘洪波, 丁邦新, 白云岗, 等. 典型干旱区绿洲春季土壤盐分空间分布特征分析[J]. 土壤通报, 2021, 52(2): 279 - 285.
- [3] 于建, 宋以玲, 丁方军, 等. 复合微生物肥料对盐胁迫下番茄生理特性的影响[J]. 土壤通报, 2020, 51(2): 372 - 380.
- [4] 路嘉丽, 沈光, 王琼, 等. 落叶松、水曲柳、樟子松和农田土壤指标差异及其综合比较[J]. 生态学报, 2017, 37(10): 3543 - 3552.
- [5] 李珊, 杨越超, 姚媛媛, 等. 不同土地利用方式对山东滨海盐碱土理化性质的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59(4): 1012 - 1024.
- [6] Gunarathne V, Senadeera A, Gunarathne U, et al. Potential of biochar and organic amendments for reclamation of coastal acidic-salt affected soil[J]. Biochar, 2020, 2(1): 107 - 120.
- [7] 樊丽琴, 李磊, 吴霞, 等. 不同培肥措施对银北灌区土壤盐碱特性、玉米生长及产量指标的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021, (6): 120 - 128.

- [ 8 ] Zhang Z, Feng S, Luo J, et al. Evaluation of microbial assemblages in various saline-alkaline soils driven by soluble salt ion components[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69(11): 3390 – 3400.
- [ 9 ] 郭永龙, 刘友兆, 王利环. 华北山区不同海拔台地不同土地利用方式下土壤肥力及脱盐趋势[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(6): 131 – 134.
- [ 10 ] Lu T, Wang X, Xu M, et al. Dynamics of pedogenic carbonate in the cropland of the North China Plain: Influences of intensive cropping and salinization[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 292: 106820.
- [ 11 ] 景宇鹏, 李跃进, 高 娃, 等. 不同利用方式河套平原盐碱土盐分特征[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(1): 372 – 379.
- [ 12 ] 王雪梅, 康 璇, 赵 枫. 不同土地利用方式下渭-库绿洲土壤盐渍化特征分析[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(1): 160 – 164.
- [ 13 ] 张骏达. 北京市城区绿地土壤理化性质及细菌群落结构研究[D]. 北京林业大学, 2019.
- [ 14 ] 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培, 等. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [ 15 ] 贾 娇, 何 萍, 徐 杰, 等. 天津中东部平原区土壤盐分空间分布特征[J]. *环境工程技术学报*, 2021, 11(4): 711 – 719.
- [ 16 ] 朱昌达, 高明秀, 王文倩, 等. 基于GIS的滨海盐渍化农田土壤空间变异及其分区管理[J]. *生态学报*, 2020, 40(19): 6982 – 6990.
- [ 17 ] 景宇鹏, 连海飞, 李跃进, 等. 河套盐碱地不同利用方式土壤盐碱化特征差异分析[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(4): 354 – 363.
- [ 18 ] 张若崑. 北京通州区区域绿色空间的风光特征评估研究[D]. 北京林业大学, 2018.
- [ 19 ] 孔祥斌. 华北集约化农区土地利用变化及其可持续评价[D]. 中国农业大学, 2003.
- [ 20 ] Xiao R, Tian Y, Xu G. Spatial gradient of urban green field influenced by soil sealing[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 735: 139490.
- [ 21 ] Mónok D, Kardos L, Pabar S A, et al. Comparison of soil properties in urban and non-urban grasslands in Budapest area[J]. *Soil Use and Management*, 2021, 37(4): 790 – 801.
- [ 22 ] Nero B F, Anning A K. Variations in soil characteristics among urban green spaces in Kumasi, Ghana[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(8): 1 – 12.
- [ 23 ] 谢军飞, 丛日晨, 王月容, 等. 北京通州地表温度的时空分布特征与绿化作用[J]. *中国园林*, 2021, 37(4): 41 – 45.
- [ 24 ] Eswar D, Karuppusamy R, Chellamuthu S. Drivers of soil salinity and their correlation with climate change[J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2021, 50: 310 – 318.
- [ 25 ] Ortiz A C, Jin L. Chemical, and hydrological controls on salt accumulation in irrigated soils of southwestern US[J]. *Geoderma*, 2021, 391: 114976.
- [ 26 ] Silver W L, Hall S J, González G. Differential effects of canopy trimming and litter deposition on litterfall and nutrient dynamics in a wet subtropical forest[J]. *Forest Ecology & Management*, 2014, 332: 47 – 55.
- [ 27 ] 胡文杰, 庞宏东, 胡兴宜, 等. 竹林密度和施肥种类对幕阜山区毛竹笋产量和品质及土壤理化性质的影响[J]. *林业科学*, 2021, 57(12): 32 – 42.
- [ 28 ] 王 莹, 王西涵, 刘 云, 等. 平原造林工程影响下的河岸带土壤生态化学计量特征[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(3): 188 – 194.
- [ 29 ] 崔成乘, 查同刚, 张晓霞, 等. 北京通州平原生态林空间结构特征[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(8): 2088 – 2096.
- [ 30 ] Liu B, Wang S, Liu X, et al. Evaluating soil water and salt transport in response to varied rainfall events and hydrological years under brackish water irrigation in the North China Plain[J]. *Geoderma*, 2022, 422: 115954.
- [ 31 ] 高铭骏, 汪 旭, 孟玲珑, 等. 沿海发展区海水入侵与土壤盐渍化空间关联解析[J]. *环境化学*, 2022, 41(3): 987 – 1000.
- [ 32 ] Zhu L, Jia X, Li M, et al. Associative effectiveness of bio-organic fertilizer and soil conditioners derived from the fermentation of food waste applied to greenhouse saline soil in Shan Dong Province, China[J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 167: 104006.
- [ 33 ] Li J, Sun X, Li S. Effects of Garden Waste Compost and Bentonite on Muddy Coastal Saline Soil[J]. *Sustainability*, 2020, 12(9): 3602.
- [ 34 ] 赵惠丽, 于金艺, 刘涛, 等. 秸秆与脱硫石膏配施改良黄河三角洲盐碱地的理化性质[J]. *环境科学*, 44(7): 4119-4129.
- [ 35 ] Equiza M A, Calvo-Polanco M, Cirelli D, et al. Long-term impact of road salt (NaCl) on soil and urban trees in Edmonton, Canada[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2017, 21: 16 – 28.
- [ 36 ] Wakeel A. Potassium-sodium interactions in soil and plant under saline-sodic conditions[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2013, 176(3): 344 – 354.
- [ 37 ] Jalali M, Arian T M, Ranjbar F. Selectivity coefficients of K, Na, Ca, and Mg in binary exchange systems in some calcareous soils[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, 192(2): 1 – 14.
- [ 38 ] 金丽华, 郑雅莲, 张世文. 通州土壤资源及其高效利用[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2014.
- [ 39 ] 康满萍, 赵成章, 李群. 苏干湖湿地土壤全盐含量特征及其与地下水的关联分析[J]. *生态学报*, 42(22): 9026-9034.
- [ 40 ] Mashal K, Al-Qinna M, Salahat M, et al. Spatial variations of urban soil salinity and related ions in arid and semiarid areas[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, 15(14): 1 – 16.
- [ 41 ] Wang M, Zhu Y, Zhao T, et al. Chemical characteristics of salt migration in frozen soils during the freezing-thawing period[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 606: 127403.

## Soil Salinization Characteristics in Different Land Use Soils

WANG Chen-chen, SUN Xiang-yang\*, LI Su-yan, LIU Yuan-xin, YUE Zong-wei, ZHA Gui-chao  
(College of Forestry, Beijing Forestry University, Key Laboratory for Silviculture and Conservation of  
Ministry of Education, Beijing 100083, China)

**Abstract:** [Objective] The effects of three land use patterns (urban green space, plain afforestation and plant nursery) on soil salinization were studied, so as to provide a scientific basis for rational selection of afforestation and afforestation types, effective genetic control of soil salinization and sustainable development of land use. [Methods] In the spring of 2022, 54 urban green space, plain afforestation and plant nursery with common tree species were selected in Tongzhou District of Beijing, and 324 soil samples were collected from 0 ~ 20 cm and 20 ~ 40 cm soil layers, respectively. The total salt content, major anion content and composition, and alkalization index of soil in each soil layer were determined. The single factor analysis of variance, correlation analysis and Kriging interpolation method were used to analyze the soil saline-alkali characteristics under different land use patterns, and to explore the reasons for their formation. [Results] The soil in the study area is generally alkaline, with a pH range of 8.39 ~ 8.53, suggesting a moderate or lower degree of salinization and alkalization. Different land use types resulted in changes in soil total salt content, ion composition, and distribution. The soil salt distribution in urban green space is "surface aggregation" and the overall salt content,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  concentrations were much higher than that of plain afforestation and nursery. In the study area, the fluctuation coefficient of soil  $\text{Na}^+$  was the highest, while that of  $\text{Ca}^{2+}$  was the lowest. Except for  $\text{Na}^+$ , the fluctuation coefficients of all ions in urban green space soil were higher than these in afforestation and nursery soil. The spatial distribution of soil total salt content and salinization degree in the 0 ~ 20 cm layer was largely consistent in terms of spatial distribution characteristics. The salinization degree was relatively high in the northern section of the research area and gradually declines from north to south. [Conclusion] Land use types in the study area led to variation of soil salinization characteristics. Urban green soil was prone to secondary salinization, while afforestation and nursery management measures and litter return ratio in plain soil may reduce secondary salinization by changing soil salt content, composition and alkalinity degree.

**Key words:** Land use type; Urban green space; Salinity characteristics; Spatial distribution

[责任编辑: 裴久渤 高晓丹]