

河套盐碱地不同利用方式土壤盐碱化特征差异分析

景宇鹏^{1,2}, 连海飞², 李跃进¹, 李秀萍², 高 娃², 狄彩霞², 栗燕芳², 康文钦²

(1.内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 呼和浩特 010011; 2.内蒙古自治区农牧业科学院, 呼和浩特 010031)

摘要: 为研究河套平原盐碱地在不同利用方式对土壤盐碱化特征分布的影响, 通过野外调查取样和室内分析相结合的方法, 对 5 种土地利用方式下(林地、农用地、牧草地、改良地、盐荒地)不同深度土壤剖面形态特征、可溶盐含量、盐分离子组成、总碱度、pH、碱化度等指标的变化规律进行了系统研究。结果表明: 不同利用方式土壤剖面土体结构、颜色、根系分布、石灰性反应及碱化层分布均有明显差异; 土壤剖面的可溶性盐、阴阳离子分布因土地利用方式不同而存在差异, 牧草地和林地土壤剖面可溶性盐呈“橄榄”型、盐荒地和改良地呈“表聚”型、农用地呈“底聚”型; 土壤 pH、碱化度和总碱度在剖面中的分布特征基本一致, 呈“S”型; 经不同利用方式土壤的盐化程度和碱化程度均有所下降, 与盐荒地相比, 农用地盐碱化指标下降的最为显著($P<0.05$), 其中 0—20 cm 土壤全盐量降至 0.88 g/kg, pH 降至 7.83, 总碱度、ESP 降至 0.17 cmol/kg 和 12.54%, 表明苏打盐碱地经农用地后更有利于土壤脱盐化过程和脱碱化过程; 土壤全盐量、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、总碱度、pH 可作为控制区域盐碱化的主要因子。研究结果为阐明河套平原盐碱地的盐碱化过程及盐碱化土壤利用模式提供技术参考。

关键词: 盐碱地; 土地利用方式; 土壤剖面; 盐碱特征

中图分类号: S156.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2020)04-0354-10

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.04.051

Analysis on the Difference of Soil Salinization Characteristics in Hetao Saline-alkali Soil with Different Land Use

JING Yupeng^{1,2}, LIAN Haifei², LI Yuejin¹, LI Xiuping²,

GAO Wa², DI Caixia², LI Yanfang², KANG Wenqin²

(1.College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010011; 2.Inner Mongolia Academy of Agriculture and Animal Husbandry Sciences, Hohhot 010031)

Abstract: In order to study the effect of different land use of saline-alkali soil on the soil salinization characteristics, the field investigation, sampling and indoor analysis were conducted. The morphological characteristics, soluble salt content, composition of salt ions, total alkalinity, pH, alkalinity and other indicators of soil profile were studied in six soil depths under five land use, namely, forest land, agricultural land, grassland, improved land and salt wasteland in Hetao plain. The results showed that there were significant differences in soil structure, color, root distribution, lime reaction and alkalization of soil in different land use systems. The distribution of soluble salt and anion in soil profile was different due to different land use. Among them, grassland and forest land, were “olive”, salt wasteland and improved land were “surface accumulation”, and agricultural land was “bottom accumulation”. The distribution characteristics of soil pH, alkalinity and total alkalinity in the profile were basically the same, showing an “S” pattern. The salinization degree and alkalization degree of soil decreased with the different land use of saline-alkali soil, among which agricultural land was the most obvious. The total salinity, total pH alkalinity and ESP values of 0—20 cm soil decreased to 0.88 g/kg, 7.83, 0.17 cmol/kg and 12.54%, respectively, indicating that soda-saline and alkaline land was more conducive to soil desalination and dealkalization after agricultural use. Soil total salinity, Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , total alkalinity and pH were the main factors of salinization in the studied area. These research results could provide technical reference for clarifying the salinization process

and the improvement of salinized soil in Hetao plain.

Keywords: Hetao saline-alkali soil; land use; soil profile; content and composition of soil soluble salt

土壤盐碱化问题是一个世界性问题,也是土地退化和土壤肥力下降的重要表现,不仅造成资源的严重破坏,而且给生态环境和经济社会的发展带来了严重的危害,成为制约区域生态环境与农业高效利用的重要因素^[1-2]。我国盐碱化土地面积大,分布广^[3],盐碱化现象在全国范围内普遍存在,尤其在西北干旱半干旱区更加严重^[4],直接威胁区域农业的可持续发展。河套平原地处内陆,是我国西北最主要的农区与生态脆弱区,由于气候干旱,蒸发强烈,地势低洼,成土母质含盐量及地下水位较高等原因以及长期不合理的耕灌制度,使得区域盐碱地面积和盐碱化程度逐年增加,耕地盐渍化面积从原来的 1/3 增加至 1/2^[5],土壤质量和土壤肥力严重下降,土壤盐碱化已成为制约河套平原土地资源利用的主要障碍因子^[6]。因此,开展土壤盐碱化特征的研究是有效开展区域盐渍化的防治与改良利用的前提和基础。

近年来,国内外学者^[7-15]对土壤盐分开展了大量研究,主要集中在土壤盐分及其盐分离子的统计学特征、空间分布、盐分与地下水的关系、盐分与植被相互作用关系等方面,而结合土壤剖面形态特征、盐分离子组成等特性深入分析不同土地利用方式盐碱土特征的研究较为鲜见。因此,选择河套平原盐碱地,开展不同利用方式土壤剖面形态特征、盐分离子组成等盐碱化特征的定量分析,基于相关性分析和主成分分析相结合的方法,揭示控制区域土壤盐碱化的特征因子,不仅可以填补该区域盐碱地土壤剖面形态特征研究工作的缺失,而且能为该区域盐碱地土地利用方式的优化和利用潜力的提高提供技术参考,促进盐碱地后备耕地资源的合理开发与高效利用。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于河套平原的前套地区土默特左旗北什轴乡海流图村(内蒙古农业大学科技示范园区)(40°38'N,111°28'E),属中温带大陆性气候,地形平坦,由黄河及其支流大黑河冲积物以及盆地沉积物堆积而成,海拔高度 990~1 140 m,多年平均气温 5.8℃,极端最高气温 39.3℃,极端最低气温-37.4℃,≥10℃年积温 1 700~3 200℃,无霜期 90~132 d;年降水量 390~400 mm 左右,年蒸发量 2 000~2 500 mm,蒸降比 5.12~6.25,湿润度 K 值为 0.45。降水年季分布不均,主要集中在 7—9 月,占年降水量的 70%~80%;地下水位 1.95~3.40 m,地下水矿化度为 0.55~2.59 g/L,pH 7.80~8.22,中性或弱碱性

水,水化学类型为 HCO_3^- — Na 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 型水;土壤剖面呈强碱性反应,pH 8.5~10.0。自然植被多属于中旱生和湿生性植物为主,主要有碱蓬(*Suaeda glauca* Bunge)、马莲(*Iris lactea*)、芨芨草(*Achnatherum splendens* (Trin.) Nevski)、剪刀股(*Ixeris japonica*)、车前草(*Plantago depressa* Willd.)、碱蒿(*Artemisia anethifolia* Web.)、芦苇(*Phragmites australis* (Cav.) Trin)、披碱草(*Elymus dahuricus* Turcz.)、骆驼蓬(*Peganum harmala* L.)、盐爪爪(*Kalidium foliatum* (Pall.) Moq)、苦豆子(*Sophora alopecuroides* L.)、猪毛菜(*Salsola collina* Pall)、山苦荬(*Ixeris denticulata*)等^[16];土壤主要以盐化草甸土、草甸盐土、苏打盐土为主。

1.2 土壤样品采集与分析

试验于 2016 年 5 月 10—14 日在内蒙古农业大学海流图科技示范园区选择研究区内不同利用方式下(林地、农用地、改良地、牧草地、盐荒地)的盐碱地进行取样,为控制外界因素对土壤的影响,每种利用方式尽量选取远离道路,且具有典型性和代表性的地段进行取样,每种利用方式选取 4 个试验点,挖取土壤剖面,每个样点距离约 200~300 m,按 0—10,10—20,20—40,40—60,60—80,80—100 cm 土层进行分层采集土壤样品,并进行现场土壤剖面特征描述,将采集的土壤样品装入自封袋带回实验室自然风干后,挑去石块、根径及各种新生体和侵入体,过筛处理后备用,共采集 120 个土壤样品。采集的土壤样品于 2016 年 7 月 10—29 日在内蒙古农业大学生态环境学院土壤与植物营养实验室内进行室内分析测定。样地基本情况见表 1。

1.3 分析方法

土壤 pH 采用电位法测定(土水比为 1:5);土壤可溶性盐分离子采用 1:5 的土水比浸提; CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 离子采用双指示剂中和滴定法测定; Cl^- 采用硝酸银滴定法测定; Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 采用 EDTA 滴定法测定; Na^+ + K^+ 采用差量法计算;阳离子交换量采用乙酸钠浸提火焰光度计法测定;交换性钠采用乙酸铵浸提火焰光度计法^[17]测定;土壤质地采用密度—比重计法测定。

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2007 整理并制图,采用 SPSS 16.0 统计分析软件进行相关性分析和主成分分析。采用 Pearson 相关系数分析全盐量、八大离子、pH、碱化度、总碱度间的相关性;采用主成分分析影响区域盐碱化特征的主要控制因子。

表 1 取样点基本情况

土地利用方式	北纬	东经	海拔高度/m	土地利用情况
盐荒地	111°22′12.8″	40°40′37.1″	992	一直处于撂荒状态,植被主要以碱蒿、羊草、苔草、碱蓬、芦苇、盐爪爪为主,盖度约 20%,均高<15 cm
改良地	111°21′52.1″	40°41′26.1″	997	施用脱硫石膏和有机肥,靠自然植被恢复 8 年。现主要以碱蓬、碱茅、羊草、芦苇、山苦荬、蒲公英、猪毛菜等植被为主,盖度约 40%,均高 20 cm
牧草地	111°22′28.4″	40°41′21.7″	990	施用脱硫石膏和有机肥,耕种 7 年,种植 2 茬紫花苜蓿,在种植第 2 茬苜蓿时施用农家肥 2 t/667 m ² ;每年 6 月初灌溉 1 次,追施尿素 15 kg/667 m ²
农田地	111°22′14.3″	40°40′40.9″	992	施用脱硫石膏和有机肥,连续 7 年种植玉米,每年施用农家肥 2 t/667 m ² ;每年在玉米拔节期灌溉 1 次;施用玉米混合肥 40 kg/667 m ²
林地	111°22′46.5″	40°40′49.3″	1000	施用脱硫石膏和有机肥育苗 6 年,育苗树种主要有杨树苗和松树苗;每年 7 月初灌溉 1 次

土壤全盐量(g/kg)=8 个盐分离子质量分数(g/kg)之和

土壤总碱度为 HCO₃⁻ 和 CO₃²⁻ 的质量分数之和,即土壤总碱度(g/com1)=(CO₃²⁻)+(HCO₃⁻)

土壤碱化度(ESP)= 交换性钠/阳离子交换量×100%

碱土划分标准:将碱化层 ESP>30%、表层含盐量<5.0 g/kg 和 pH>9.0 定为碱土;ESP 在 5%~10%为轻度碱化土壤,10%~15%为中度碱化土壤,15%~20%为强碱化土壤。

盐渍土土属划分标准^[18]:依据全盐组成中阴离子毫克当量比值进行,找出主成分后外加一副成分来划分土属,即 N1(CO₃²⁻+HCO₃⁻)与 N2(Cl⁻+SO₄²⁻)的比值反映盐碱土类型,其中 N1(CO₃²⁻+HCO₃⁻):N2(Cl⁻+SO₄²⁻)<1 属于氯化物或硫酸盐盐渍土范畴;(1)Cl⁻:SO₄²⁻>4 属于氯化物盐渍土;(2)Cl⁻:SO₄²⁻=2~4 属于硫酸盐氯化物盐渍土;(3)(CO₃²⁻+HCO₃⁻):Cl⁻>1 属于苏打氯化物盐渍土;(4)(CO₃²⁻+HCO₃⁻):SO₄²⁻<1 属于苏打氯化物盐渍土。N1(CO₃²⁻+HCO₃⁻):N2(Cl⁻+SO₄²⁻)比值在 1~4 属于氯化物或硫酸盐苏打盐渍土范畴。

2 结果与分析

2.1 土壤剖面形态特性分析

不同土地利用方式直接影响土壤发育方向及熟化程度,使得土壤剖面形态、理化性质均有不同程度的变化。从表 2 可以看出,不同土地利用方式土壤剖面特征既有相似点,也有差异性。其共同特点为:(1)剖面土体均有明显的碱化特征,且剖面层次间碱化程度呈逐渐或模糊过渡;(2)剖面土体均有明显的石灰反应;(3)随土层逐渐增加土体出现明显的碱化层,且在 40 cm 土层以下多为棱柱状结构。其差异性表现为:(1)盐荒地地表有明显的结皮层,土体各层石灰反应均比其他利用方式强烈;(2)盐荒地和改良地 0—40 cm 土层植物根系较少,40 cm 以下基本没有根系分布;而农用地和牧草地 0—40 cm 土层植物根系分布

较多,60 cm 以下基本没有根系分布;林地 1 m 土体均有植物根系分布,且随土层厚度增加根系量减少;(3)林地和农田表层土壤颜色暗度明显高于盐荒地和改良地,且土体结构性也较其他利用方式好;林地和农用地表层 0—10 cm 土壤有机质、全氮、速效养分均显著高于其他利用方式。

2.2 土壤盐分离子组成

2.2.1 土壤盐分离子剖面分布特征 土壤盐分是由多种可溶性盐分离子组成,不同类型盐碱土盐分离子组成存在明显差异,其组成决定土壤脱盐的难易程度。由表 3 可知,牧草地和林地土壤剖面盐分离子组成中间层分布多,上下层分布相对较少,10—60 cm K⁺+Na⁺、SO₄²⁻、HCO₃⁻、CO₃²⁻ 含量较高,说明这 2 种土地利用方式有抑制盐分表聚的作用;盐荒地和改良地剖面盐分组成呈“表聚”型,即随土层深度增加,离子含量减少,主要以 Ca²⁺、SO₄²⁻ 表聚现象尤为显著;农用地剖面盐分组成呈底聚型,K⁺+Na⁺、HCO₃⁻ 含量随土层深度的增加而增大。盐荒地阴离子含量以 SO₄²⁻、Cl⁻、CO₃²⁻ 为主,而农用地土壤中无 CO₃²⁻,阴离子含量以 HCO₃⁻ 为主。与盐荒地相比,其他 4 种土地利用方式 SO₄²⁻ 含量均有明显降低的变化趋势,其中农用地平均降幅最大,为 94.18%,改良地降幅最小,为 54.62%;CO₃²⁻ 含量也有明显降低,其中农用地降幅最大,无 CO₃²⁻ 存在,改良地降幅最小,为 16.28%;HCO₃⁻ 含量下降幅度较小,其中农用地降幅最大,为 24.33%,林地降幅最小,为 7.66%;而 Cl⁻ 含量变化趋势不一致,改良地、牧草地和农用地 Cl⁻ 含量增加,林地 Cl⁻ 含量上升。盐荒地土壤阳离子以 K⁺+Na⁺ 为主,而其他 4 种土地利用方式主要以 Ca²⁺ 为主。与盐荒地相比,其他 4 种土地利用方式阳离子含量均有降低的变化趋势,其中农用地 Ca²⁺、Mg²⁺ 降幅最大,分别为 88.29%,92.51%;林地 K⁺+Na⁺ 降幅最大,为 61.40%。整体来看,不同土地利用方式土壤剖面阴离子以 SO₄²⁻、HCO₃⁻、Cl⁻ 为主,阳离子以 Ca²⁺、K⁺+Na⁺ 为主。

表 2 不同土地利用方式土壤剖面形态特征

土地利用方式	土层深度/cm	土壤颜色	土壤结构	土壤结构性	石灰反应	根系	土壤质地
盐荒地	0—10	灰白色	片状	松	强烈	少	壤质黏土
	10—20	灰白色	柱状	硬	强烈	少	黏土
	20—40	浊黄色	柱状	硬	强烈	少	壤质黏土
	40—60	浑浊黄色	棱柱状	硬	强烈	无	壤质黏土
	60—80	黄棕色	棱块状	硬	强烈	无	壤质黏土
	80—100	灰黄色	棱块状	硬	中等	无	砂质黏土
改良地	0—10	灰白色	粒状	松	中等	少	壤质黏土
	10—20	浊黄色	柱状	硬	中等	少	壤质黏土
	20—40	浊黄色	棱柱状	硬	中等	少	黏壤土
	40—60	浊黄色	棱块状	硬	强烈	无	黏壤土
	60—80	黄棕色	棱块状	硬	强烈	无	砂质黏土
	80—100	灰黄色	棱块状	硬	强烈	无	砂质黏土
牧草地	0—10	灰色	粒状	松	中等	多	壤黏土
	10—20	浅灰色	柱状	硬	中等	较多	壤黏土
	20—40	浊黄色	棱柱状	硬	强烈	较多	壤质黏土
	40—60	淡黄色	棱块状	硬	强烈	少	壤质黏土
	60—80	浊黄色	棱块状	硬	强烈	无	砂质黏土
	80—100	浊黄色	棱块状	硬	强烈	无	砂质黏土
农田	0—10	暗灰色	粒状	疏松	中等	多	壤质黏土
	10—20	灰色	粒状	松	中等	较多	粉砂质黏土
	20—40	暗灰黄色	粒状	硬	强烈	较多	壤黏土
	40—60	淡黄色	棱柱状	硬	强烈	少	壤黏土
	60—80	浊黄色	棱块状	硬	强烈	无	黏壤土
	80—100	浊黄色	棱块状	硬	中等	无	黏壤土
林地	0—10	暗暗灰	粒状	疏松	中等	多	黏壤土
	10—20	浅暗灰	粒状	松	中等	多	壤质黏土
	20—40	淡灰色	粒状	硬	中等	较多	砂质黏土
	40—60	淡灰黄色	棱柱状	硬	中等	较多	砂质黏土
	60—80	淡黄色	棱柱状	硬	强烈	少	砂质黏土
	80—100	淡黄色	棱柱状	硬	强烈	少	砂质黏土

同时土壤中盐分离子组成不同,其土壤盐碱类型、盐碱化程度也不同,对植物的危害程度也不尽相同。按照盐渍土类型划分标准可知,不同土地利用方式 N1/N2 的比值均小于 1,盐荒地和改良地土壤中 $N(CO_3^{2-} + HCO_3^{-}) : N(Cl^{-}) > 1$ 、 $N(CO_3^{2-} + HCO_3^{-}) : N(SO_4^{2-}) < 1$,属于苏打氯化物型;而农用地、牧草地和林地 $N(CO_3^{2-} + HCO_3^{-}) : N(Cl^{-}) < 1$ 、 $N(CO_3^{2-} + HCO_3^{-}) : N(SO_4^{2-}) > 1$ 属于苏打硫酸盐型,故盐碱地经不同土地利用方式后土壤盐碱化类型发生了明显变化。

2.2.2 土壤盐分离子间的相关性 为进一步了解盐碱化土壤利用过程中土壤盐分与其组成离子之间的变化关系,分别对其进行了相关性分析,揭示土壤盐分在土体中的存在形态以及盐分间相关性,在一定程度上能反映出盐分的运移规律和形成原因。相关性分析结果表明,0—10 cm 土层全盐量除与 Cl^{-} 、 CO_3^{2-} 差异不显著外,与其他离子均呈显著或极显著的正相关,其中与 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 CO_3^{2-} 呈极显著相关,相

关系数分别为 0.998,0.979,0.972;土壤 pH 与 CO_3^{2-} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^{-} 呈显著相关;土壤碱化度除与 Cl^{-} 差异不显著外,与其他离子均呈显著或极显著相关,其中与 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 呈极显著相关,相关系数分别为 0.992,0.979; $K^{+} + Na^{+}$ 与 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 呈显著相关; SO_4^{2-} 与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 呈极显著相关。10—20 cm 土层全盐量除与 Cl^{-} 、 HCO_3^{-} 差异不显著外,与其他离子均呈显著或极显著相关,其中与 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 呈极显著相关,相关系数分别为 0.998,0.969;土壤 pH 与 CO_3^{2-} 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 呈显著相关;土壤碱化度与 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 呈极显著相关,相关系数分别为 0.998,0.968; $K^{+} + Na^{+}$ 与其他离子差异不显著; SO_4^{2-} 与 Mg^{2+} 呈极显著相关,与 Ca^{2+} 呈显著相关。20—40 cm 土层全盐量、pH 与 SO_4^{2-} 呈极显著相关,相关系数分别为 0.998,0.957,与 Mg^{2+} 、 CO_3^{2-} 、 $K^{+} + Na^{+}$ 呈显著相关;土壤碱化度与 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 、 $K^{+} + Na^{+}$ 呈显著相关。40—60 cm 土层全盐量、pH 与 SO_4^{2-} 呈极显著相关,相关系数为 0.987;土壤碱化度与 SO_4^{2-} 呈极显著相关,与 Mg^{2+} 呈显著相关; SO_4^{2-} 与

Mg²⁺、CO₃²⁻ 呈显著相关。60—80 cm 土层全盐量与 SO₄²⁻ 呈显著相关;碱化度与 SO₄²⁻、HCO₃⁻ 呈显著相关;SO₄²⁻ 与 CO₃²⁻ 呈极显著相关,相关系数 0.971,与 Ca²⁺ 呈显著相关。80—100 cm 土层全盐量与 Cl⁻、Mg²⁺ 呈显著相关;SO₄²⁻ 与 CO₃²⁻ 呈极显著相关,相关

系数为 0.958。对比分析不同土层深度各盐分离子之间的相关性可知,随土层深度的增加,各离子间相关系数变化明显,全盐量与 SO₄²⁻、HCO₃⁻ 与 Mg²⁺、Mg²⁺ 与 SO₄²⁻、碱化度与 Ca²⁺、Mg²⁺、CO₃²⁻ 相关性逐渐减小,均在表层 0—20 cm 达极显著相关。

表 3 不同利用方式土壤剖面可溶盐离子分布特征

单位:g/kg

土地利用类型	土层深度/cm	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺ +Na ⁺
盐荒地	0—10	0.055±0.002	0.971±0.054	0.070±0.003	5.545±0.006	1.226±0.022	0.722±0.002	0.381±0
	10—20	0.067±0.002	0.896±0.008	0.095±0.007	5.291±0.103	1.028±0.016	0.761±0.025	0.422±0.021
	20—40	0.087±0.010	0.650±0.005	0.129±0.006	3.942±0.031	0.684±0.020	0.630±0.010	0.379±0.017
	40—60	0.097±0.009	0.556±0.041	0.121±0.005	2.439±0.032	0.436±0.013	0.379±0.021	0.389±0.014
	60—80	0.110±0.004	0.210±0.100	0.098±0.004	0.949±0.010	0.198±0.043	0.129±0.010	0.297±0.018
	80—100	0.143±0.004	0.035±0.002	0.091±0.007	0.891±0.021	0.126±0.005	0.092±0.003	0.400±0.010
改良地	0—10	0.031±0.002	0.205±0.013	0.065±0.003	2.632±0.031	0.767±0.050	0.226±0.008	0.120±0.013
	10—20	0.056±0.006	0.321±0.058	0.092±0.008	1.923±0.053	0.699±0.030	0.105±0.034	0.186±0.022
	20—40	0.072±0.002	0.373±0.008	0.108±0.005	1.479±0.005	0.631±0.022	0.052±0.002	0.208±0.104
	40—60	0.083±0.003	0.523±0.036	0.298±0.006	1.042±0.068	0.476±0.013	0.066±0.018	0.346±0.013
	60—80	0.103±0.004	0.583±0.013	0.388±0.005	0.901±0.015	0.290±0.022	0.157±0.027	0.433±0.012
	80—100	0.122±0.005	0.664±0.014	0.388±0.005	0.671±0.095	0.105±0.014	0.188±0.009	0.536±0.017
牧草地	0—10	0.011±0.002	0.346±0.047	0.083±0.011	0.230±0.103	0.083±0.005	0.090±0.021	0.046±0.035
	10—20	0.014±0.002	0.362±0.045	0.320±0.022	0.595±0.124	0.178±0.013	0.051±0.026	0.351±0.016
	20—40	0.018±0.002	0.415±0.050	0.231±0.016	0.406±0.021	0.149±0.011	0.077±0.017	0.212±0.039
	40—60	0.018±0.002	0.459±0.025	0.133±0.023	0.492±0.024	0.123±0.005	0.150±0.018	0.098±0.004
	60—80	0.011±0.002	0.521±0.047	0.098±0.004	0.327±0.060	0.099±0.011	0.118±0.011	0.097±0.032
	80—100	0.014±0.002	0.512±0.036	0.086±0.008	0.110±0.063	0.092±0.013	0.076±0.009	0.073±0.037
农用地	0—10	0	0.152±0.005	0.295±0.016	0.151±0.051	0.139±0.015	0.031±0.015	0.102±0.102
	10—20	0	0.187±0.022	0.236±0.008	0.230±0.026	0.118±0.022	0.043±0.012	0.118±0.018
	20—40	0	0.348±0.017	0.185±0.004	0.179±0.067	0.062±0.009	0.042±0.003	0.187±0.033
	40—60	0	0.451±0.013	0.159±0.005	0.265±0.026	0.043±0.009	0.026±0.016	0.301±0.014
	60—80	0	0.615±0.013	0.129±0.007	0.158±0.021	0.023±0.007	0.025±0.007	0.317±0.006
	80—100	0	0.756±0.027	0.096±0.009	0.120±0.009	0.049±0.010	0.035±0.003	0.283±0.040
林地	0—10	0.014±0.002	0.307±0.054	0.104±0.006	0.537±0.054	0.265±0.022	0.075±0.017	0.014±0.004
	10—20	0.012±0.004	0.575±0.034	0.093±0.004	0.279±0.072	0.185±0.013	0.088±0.019	0.050±0.009
	20—40	0.011±0.002	0.713±0.029	0.083±0.004	0.320±0.027	0.151±0.017	0.054±0.004	0.217±0.005
	40—60	0.014±0.002	0.571±0.052	0.071±0.006	0.406±0.069	0.123±0.018	0.066±0.003	0.210±0.004
	60—80	0.011±0.002	0.481±0.017	0.059±0.010	0.464±0.109	0.113±0.007	0.073±0.021	0.192±0.016
	80—100	0.012±0.004	0.415±0.071	0.047±0.007	0.347±0.083	0.077±0.009	0.049±0.003	0.191±0.010

注:表中数据为平均值±标准差。

从土壤整个剖面来看(表 4),土壤全盐量除与 Cl⁻ 差异不显著外;与其他离子均表现出极显著的正相关关系,其中与阴离子相关性最强的为 SO₄²⁻,相关系数为 0.990,与 HCO₃⁻、CO₃²⁻ 的相关系数分别为 0.555,0.458;与阳离子相关性最强的为 Ca²⁺、Mg²⁺,相关系数分别为 0.925,0.953;阴阳离子间相关性最强的为 Mg²⁺ 与 SO₄²⁻,相关系数为 0.948,其次为 Ca²⁺ 与 SO₄²⁻、K⁺+Na⁺ 与 CO₃²⁻ 也为极显著正相关,说明 Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻ 对区域盐分组成具有重要作用。土壤 pH 与 HCO₃⁻、CO₃²⁻ 间存在极显著的正相关,这是因为研究区除农用地 0—40 cm 土壤 pH<8.50 外,其他土壤不同土层 pH 为 8.72~10.60,呈碱性,而碳酸盐和重碳酸盐是其主要的弱碱性盐,其含量的增加使土壤逐渐向碱化方向发展。同时,土壤碱化度又与 pH、CO₃²⁻、HCO₃⁻ 差异达极显著水平,相关系数分别为 0.717,0.534,0.461,说明碳酸盐、重碳酸盐是控制区

域土壤发生碱化的主导因子。因此,盐化和碱化导致 区域盐渍化过程的主要驱动因子。

表 4 土壤剖面盐分离子间的相关性

盐分离子	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	K ⁺ +Na ⁺	全盐量	pH	碱化度	总碱度
CO ₃ ²⁻	1										
HCO ₃ ⁻	0.008	1									
Ca ²⁺	0.372 *	0.371 *	1								
Mg ²⁺	0.396 *	0.573 **	0.807 **	1							
Cl ⁻	0.227	-0.075	-0.180	-0.158	1						
SO ₄ ²⁻	0.421 *	0.469 *	0.940 **	0.948 **	-0.204	1					
K ⁺ +Na ⁺	0.694 **	0.412 *	0.294	0.452 *	0.399 *	0.438 *	1				
全盐量	0.458 *	0.555 **	0.925 **	0.953 **	-0.113	0.990 **	0.525 **	1			
pH	0.718 **	0.488 **	0.367 *	0.551 **	-0.115	0.509 **	0.717 **	0.560 **	1		
碱化度	0.534 **	0.461 *	0.672 **	0.849 **	-0.149	0.820 **	0.572 **	0.830 **	0.717 **	1	
总碱度	0.641 **	0.738 **	0.519 **	0.691 **	0.079	0.635 **	0.778 **	0.719 **	0.838 **	0.710 **	1

注: * 表示相关性显著($P<0.05$); ** 表示相关性极显著($P<0.01$)。

2.3 土壤盐碱化特性分析

2.3.1 土壤盐碱化指标剖面特征 不同土地利用方式土壤盐分的变化在垂直方向上有着各自的特点。从表 5 可知,0—100 cm 土层土壤剖面盐分分布特征差异较大,盐荒地和改良地土壤盐分随土层深度增加而减小,呈“表聚”型,0—10 cm 土层土壤全盐量分别达 8.97,4.05 g/kg,为底层 80—100 cm 的 5.05,1.51 倍;农用地土壤盐分随土层深度增加而增大,呈“底聚”型,80—100 cm 土层土壤全盐量为 1.34 g/kg。而牧草地和林地土壤盐分随土层深度增加表现为先增加后降低的变化趋势,呈“橄榄”型,即在剖面中部土壤全盐量较大,牧草地 10—20 cm 土层最大为 1.87 g/kg,林地 20—40 cm 土层最大为 1.55 g/kg;同时从土壤全盐的变异程度来看,不同土地利用方式土壤全盐的变异系数为 8.5%~57.8%,林地土壤剖面各土层土壤全盐量变化较小,各层土壤均属轻度盐渍化,属弱变异;盐荒地、改良地、牧草地和农用地变异系数较大,属中等变异程度,其中盐荒地变异性最大,随土层深度增加土壤全盐量下降幅度较大,尤其在 10—80 cm 土层表现最为明显。整体来看,盐荒地土壤全盐量最高,平均为 5.37 g/kg,为中度盐渍化,改良地土壤全盐为 3.12 g/kg,牧草地、农用地、林地全盐量均小于 3.00 g/kg,为轻度盐渍化;与盐荒地比其他 4 种利用方式土壤全盐量降幅为 41.92%~79.33%;土壤剖面全盐量大小表现为:盐荒地>改良地>林地>牧草地>农用地。

不同土地利用方式土壤 pH 除农用地表层(0—40 cm)<8.5 外,其他利用方式土层均在 8.5 以上;盐荒地土壤 pH 最大,为 10.36,其次是改良地,农用地最小,为 8.86。盐荒地土壤 pH 随土层深度增加表现为先增大后减小,在 40—60 cm 土层最大,呈“橄榄”型;改良地、牧草地、农用地和林地土壤 pH 随土层深度

增加而增大,呈“底聚”型。不同土地利用方式土壤总碱度剖面分布特征表现不一致,盐荒地随土层深度增加而减小,呈“表聚”型;其他土地利用方式随土层深度增加而增大,呈“底聚”型。不同土地利用方式土壤碱化度剖面变化趋势基本一致,即随土层深度增加表现为先增加后降低再增大的变化趋势,呈“S”型,在 20—40 cm 土层达最大。根据我国碱土划分标准,盐荒地平均碱化度为 41.84%,属于碱化土壤;改良地和牧草地平均碱化度分别为 23.97%,20.24%,属重度碱化土壤;林地和农用地平均碱化度分别为 18.17%,13.62%,属中度碱化土壤。同时不同土地利用方式对土壤盐碱化程度影响较大,盐碱地在不同改良利用方式下土壤盐碱化程度呈逐渐降低的变化趋势,由重度碱化向中轻度碱化转化、中重度盐化向中轻度盐化转化,说明区域脱盐过程与脱碱过程同时发生。

整体来看,不同土地利用方式对土壤 pH、总碱度、碱化度的影响变化规律基本一致,均表现为盐荒地、改良地相对较高,农用地、林地、牧草地相对较低,这主要是由于农业种植、林木管理过程中耕作、施肥、灌溉等因素的综合作用改良了土壤盐分状况,使土壤中各盐分离离子含量减少;同时除盐荒地外,其他 4 种土地利用方式均向土壤中输入了大量的有机肥和脱硫石膏(Ca²⁺、SO₄²⁻),使得土壤中总碱度、pH、碱化度、 $c(\text{Cl}^-)/c(\text{SO}_4^{2-})$ 均降低。

2.3.2 土壤盐化与碱化的关系(全盐、pH、碱化度、总碱度的关系) 土壤总碱度、pH、碱化度是目前国内外比较公认的评价土壤是否发生碱化、碱化进程、碱化程度分级的重要指标和依据^[19-21]。基于以上分析,研究区土壤属苏打盐渍土,因此本文将对能够反映土壤碱化特征参数(总碱度、pH、碱化度)与盐化特征参数(全盐)间的相关性作进一步深入研究。

表 5 不同土地利用方式土壤剖面盐碱化指标分布特征

指标	土层深度	盐荒地	改良地	牧草地	农田	林地
全盐/ (g·kg ⁻¹)	0—10	8.97±0.70Aa	4.05±0.13Aa	0.89±0.21Aa	0.87±0.09Aa	1.32±0.12ABCab
	10—20	8.56±0.12Bb	3.38±0.07Bb	1.87±0.14Bb	0.93±0.11Aa	1.28±0.06BCbc
	20—40	6.50±0.10Cc	2.92±0.16Cc	1.51±0.09Cc	1.00±0.13ABa	1.55±0.15Ad
	40—60	4.42±0.10Dd	2.83±0.16Ced	1.47±0.08BCc	1.25±0.21BCb	1.46±0.15ABab
	60—80	1.99±0.03Ee	2.85±0.21Ced	1.27±0.12CDc	1.27±0.12Cb	1.39±0.13ABabd
	80—100	1.78±0.12Ff	2.67±0.14Cd	0.96±0.09ADc	1.34±0.17Cb	1.14±0.04Cc
pH	0—10	10.24±0.07Aa	8.93±0.06Aa	8.81±0.06Aa	7.76±0.09Aa	8.72±0.17Aa
	10—20	10.27±0.04Aa	9.36±0.07ABb	9.06±0.07Bb	8.03±0.08Bb	8.94±0.16ABab
	20—40	10.46±0.07Bbc	9.43±0.11ABb	9.11±0.11BCb	8.48±0.12Cc	9.04±0.07ABb
	40—60	10.56±0.04Bc	9.74±0.16Cbc	9.30±0.08DCbc	9.19±0.06Dd	9.06±0.07ABb
	60—80	10.40±0.07ABc	10.01±0.09Ced	9.42±0.09Dc	9.72±0.17Ee	9.17±0.17BCb
	80—100	10.23±0.09Aa	10.13±0.10Cd	9.77±0.10Ed	9.99±0.11Ef	9.46±0.09Cc
总碱度/ (cmol·kg ⁻¹)	0—10	1.03±0.06Aa	0.24±0.02Aa	0.36±0.05Aa	0.15±0Aa	0.32±0.06Aa
	10—20	0.96±0.01Aa	0.38±0.06Bb	0.38±0.01ABa	0.19±0.02Bb	0.59±0.04Bb
	20—40	0.74±0.02Bb	0.45±0.01Cc	0.43±0.05BCb	0.35±0.02Cc	0.72±0.03Cc
	40—60	0.65±0.05Bb	0.61±0.04Dd	0.48±0.03Cbc	0.45±0.01Dd	0.58±0.05Bd
	60—80	0.32±0.01Cc	0.69±0.02Ee	0.53±0.05Cc	0.62±0.01Ee	0.49±0.02BDd
	80—100	0.18±0.01Cc	0.79±0.02Ff	0.53±0.04Cc	0.76±0.03Ef	0.43±0.07ADd
ESP/%	0—10	42.83±2.68Aa	22.26±4.48ABab	15.41±0.90Aa	11.44±1.12Aa	11.06±1.34Aa
	10—20	51.54±4.45ABb	24.32±2.65ABabc	16.75±1.70Aa	13.65±1.58ABab	12.25±1.95Aa
	20—40	59.22±6.47Bc	30.00±3.24Ac	28.67±3.46Bb	21.08±2.70Bc	15.64±2.91Aab
	40—60	41.26±4.68ACa	21.23±2.59ABb	18.04±1.65ACa	18.54±4.76ABbc	13.21±2.54Aab
	60—80	31.19±2.53CDd	18.03±2.46Bb	19.33±2.63ACa	15.87±2.92ABabc	12.21±2.76Aa
	80—100	25.03±3.52Dd	27.97±4.00Aac	23.21±1.68Cc	28.45±2.42Cd	17.37±2.44Ab

对研究区 5 个典型样区的 20 个剖面土壤全盐、pH、总碱度、碱化度间建立回归分析模型,由图 1 可知,土壤 pH 与碱化度、全盐、总碱度呈极显著的指数关系,其中与总碱度拟合优度最高($R^2=0.789\ 1$),拟合函数表达式: $y=0.0027e^{0.6024x}$ ($P<0.01$),即土壤总碱度越大,pH 越高,即使在总碱度很低的情况下,土壤 pH 也较高,这是由于土壤中存在弱酸强碱性水解盐类发生的碱性反应,其中水解性盐类主要是指 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 的碱金属(Na、K)及碱土金属(Ca、Mg)。在正常 CO_2 分压下, CaCO_3 和 MgCO_3 在土壤溶液中的溶解度很低,pH 也较低;而 Na_2CO_3 、 NaHCO_3 在土壤溶液中的溶解度较高,使土壤中的大部分 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 以碳酸盐的形态沉淀,同时提高了 Na^+ 的交换能力,造成土壤碱化后不可逆性增强,引起 pH 显著升高,说明土壤发生盐化的同时已发生碱化现象;其次与碱化度模型拟合优度也较高($R^2=0.554$)。土壤碱化度与总碱度呈极显著对数关系,随($\text{CO}_3^{2-}+\text{HCO}_3^-$)含量增加而逐渐升高,最后稳定在某一数值水平,即随($\text{CO}_3^{2-}+\text{HCO}_3^-$)的持续升高,碱化度趋向于一个稳定的值,二者拟合优度也较高($R^2=0.516\ 8$)。土壤总碱度与全盐也呈极显著的指数关系,拟合优度也较高($R^2=0.571\ 1$),拟合函数关系表达式: $y=0.6287e^{1.0813x}$ ($P<0.01$)。

2.4 土壤盐分、碱化度和离子间的主成分分析

选择全盐、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、

Mg^{2+} 、 K^++Na^+ 、pH、碱化度、总碱度 11 个变量进行主成分分析,按照累计贡献率 $>85\%$ 、特征值 >1 来确定主成分个数,并计算主成分与各项指标的相关系数,最终选取具有代表性和限制性的土壤盐碱化特征因子。

由表 6 可知,前 3 个主因子的特征值均大于 1,第 1、第 2 和第 3 主因子的特征值分别为 6.65、1.83 和 1.00,所对应的方差贡献率分别 60.244%,16.668%和 9.087%,累计方差贡献率 86.178%。表明前 3 个主成分解释了原 11 个变量信息中的绝大部分,损失量仅为 13.822%。

从主成分载荷矩阵来看,第 1 主成分除与 Cl^- 外,与其他指标均为正向负荷,说明第 1 主成分能较全面反映该区域土壤的盐渍化状况。从得分系数矩阵来看,与第 1 主成分密切相关的是全盐量、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ,得分系数分别为 0.322,0.278,0.229,0.201,且具有较高的正载荷;同时 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 又与全盐量呈极显著相关,故第 1 主成分替代了 11 个原始因子中的全盐量、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 4 个因子的作用,可以综合反映出土壤的盐化程度。在第 2 主成分因子变量中, HCO_3^- 、总碱度、pH 具有较其他变量更高的载荷,呈正相关,得分系数分别为 0.644,0.335,0.259;第 2 主成分替代了 11 个原始因子中的 HCO_3^- 、总碱度与 pH 3 个因子的作用,可以代表土壤的碱化特征。第 3 主成分中, CO_3^{2-} 的载荷

较高,呈正相关,得分系数为 0.730。由于 CO_3^{2-} 是土壤总碱度的一部分,可以说第 3 主成分 是第 2 主成分的补充因子,用以表示除 HCO_3^- 与 pH 土壤碱化特征离子之外又一碱化特征离子。第 3 主成分仅替

代了 11 个原始因子中的 CO_3^{2-} 1 个因子的作用。因此,根据各指标与各主成分间的相关性显著程度,可将全盐量、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、总碱度、pH 作为研究区盐碱化土壤盐碱状况的特征因子。

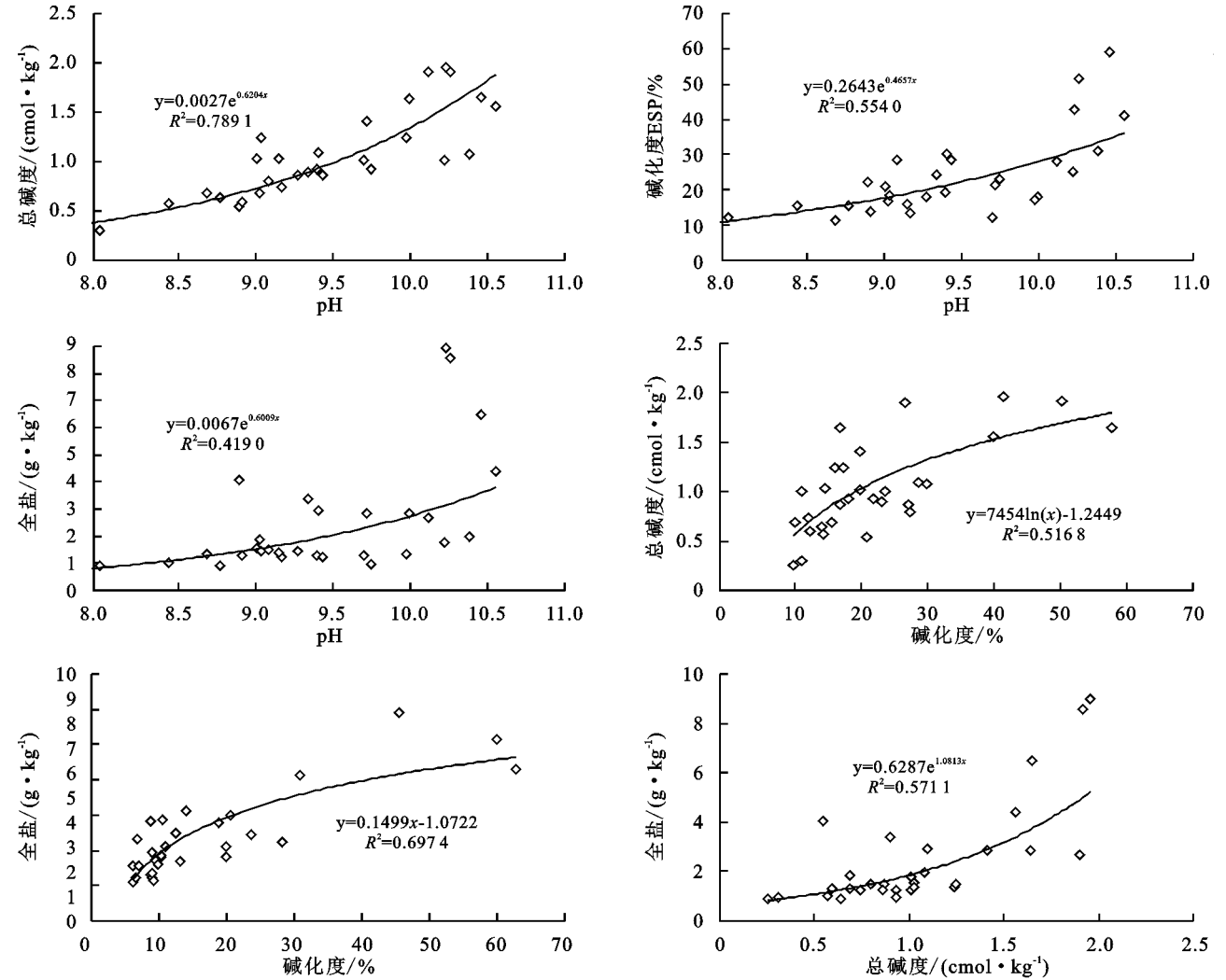


图 1 土壤盐碱化指标间的关系

表 6 主成分因子的载荷矩阵和得分系数矩阵

因子变量	因子载荷矩阵			成分得分系数矩阵		
	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 1	主成分 2	主成分 3
CO_3^{2-}	0.401	0.088	0.824	0.095	-0.232	0.435
HCO_3^-	0.236	0.915	-0.134	-0.196	0.644	-0.274
Cl^-	-0.295	-0.097	0.676	-0.102	-0.121	0.313
SO_4^{2-}	0.957	0.250	0.065	0.278	-0.128	-0.047
Ca^{2+}	0.940	0.095	0.016	0.322	-0.230	-0.042
Mg^{2+}	0.870	0.389	0.065	0.201	0.005	-0.073
$\text{K}^+ + \text{Na}^+$	0.247	0.500	0.755	-0.090	0.142	0.315
全盐量	0.913	0.344	0.136	0.229	-0.058	-0.025
pH	0.380	0.633	0.473	-0.074	0.259	0.123
碱化度	0.764	0.406	0.249	0.150	0.012	0.031
总碱度	0.443	0.750	0.436	-0.086	0.335	0.076
特征值	6.647	1.833	1.000			
贡献率/%	60.424	16.668	9.087			
累计贡献率/%	60.424	77.091	86.178			

3 讨论

近年来,随着人类活动对土地资源的不断干扰,土地资源与环境间的矛盾日益突出,土地利用变化对土壤干扰程度也越来越重,必将导致土壤性质向着不同方向演变^[22]。在内蒙古河套平原地区由于人类对水土资源的不合理利用,土壤盐渍化现象十分普遍,土壤质量严重低下,盐碱胁迫已成为影响该地区农业生产和土地生产力的最主要胁迫因子^[23]。

在不同的人类活动干扰下,土壤盐渍化特征呈现出显著差异。土壤阳离子中 Ca^{2+} 占据绝对优势, $\text{Na}^{+} + \text{K}^{+}$ 次之,阴离子中 SO_4^{2-} 占据绝对优势, Cl^{-} 次之,这与景宇鹏等^[5]对河套平原弃耕地土壤盐碱化特征研究结果不一致,主要是由于所处区域的土壤盐碱化特征不同所造成的。本研究所处区域为河套平原的前套地区,土壤类型主要以苏打盐土为主,而后者研究区域为河套平原的后套地区,土壤类型为盐土、盐化土、灌淤土为主。研究区大面积的盐碱荒地被开发利用,土壤盐碱指标显著下降,其中全盐下降 41.92%~79.33%,碱化度下降 42.71%~67.44%,pH 下降 0.76~1.50 个单位,有利于盐碱化土壤的良性发展;同时从土壤剖面盐分分布特征来看,盐荒地、改良地土壤盐分具有表聚的特征,尤其是盐荒地地表聚现象尤为显著,这是由于盐荒地基本未受人类活动影响,加之区域处于半干旱地区,降雨少,蒸发量大,盐分上行而表聚,同时改良地在区域进行大面积的盐碱化治理初期进行土地平整时只施用过 1 次脱硫石膏和有机肥,后期基本未进行任何扰动,故与盐荒地表现出一致的变化现象,表聚现象明显;而农用地因受长期耕作、施肥和灌溉等因素的综合作用,改变了土体中盐分的重新分配,有利于土体脱盐,尤其每年种植玉米,进行耕翻、施用有机肥,有机肥的大量投入增加了土壤有机质含量,有机质中的大分子羧基中和土壤中的碱性物质增加了土壤胶体吸附盐基离子的能力,与土壤中的各种阳离子结合生成腐殖酸盐,从而降低盐分离子含量;且与有机肥在分解过程中产生有机酸,增强土壤对 pH 的缓冲能力,降低了土壤 pH;同时大量有机肥能够增加土壤孔隙度,提高入渗速率,以及每年持续的灌溉,脱盐效果显著,有利于耕层土壤全盐含量的降低,这与王雪梅等^[24]、王丹丹等^[25]、贡璐等^[10]对不同区域土地利用方式下土壤盐碱化特征研究结果相一致;而林地和牧草地土壤盐分在剖面中的分布比较均匀,这可能由于地表有大量未分解的枯枝落叶覆盖,减少一部分土壤水分的蒸发,抑制盐分表聚,这使盐荒地和盐碱草地对盐分的富集能力明显强于耕地和林地。因

此,在今后开发利用盐渍化土地资源过程中,特别需要关注土壤中盐分运移特征。

4 结论

(1)不同土地利用方式土壤剖面中土壤结构、颜色、根系分布及石灰性反应均有很大差异,且碱化特征在土体中分布较明显。林地和农用地表层暗度、根系量、结构性等均明显优于盐荒地和改良地;林地和农用地土壤剖面表层 0—40 cm 以团粒和粒状结构为主,根系量多,土壤颜色暗,土体结构性也较其他利用方式好。

(2)不同土地利用方式土壤剖面盐分组成以 SO_4^{2-} 、 HCO_3^{-} 、 Cl^{-} 、 Ca^{2+} 、 $\text{K}^{+} + \text{Na}^{+}$ 为主,且剖面的可溶盐组成分布特征有明显差异。牧草地和林地土壤剖面盐分离子组成中间分布多,上下分布少,有抑制盐分表聚的作用;盐荒地和改良地剖面盐分组成呈“表聚”型;农用地剖面盐分组成呈“底聚”型。

(3)不同土地利用方式土壤全盐量、pH、碱化度剖面分布特征不同,且三者呈极显著的相关关系。盐荒地和改良地土壤盐分随土层深度增加而减小,牧草地和林地土壤盐分随土层深度增加表现为先增加后降低的变化趋势,农用地土壤盐分随土层深度增加而增大;土壤剖面碱化度与 pH 的变化规律基本一致,即随土层深度增加表现为先增加后降低再增大的变化趋势。土壤剖面全盐量、pH、碱化度大小均表现为:盐荒地>改良地>牧草地>林地>农用地。通过田间农作物、林地、牧草植物对土壤的长期影响,农用地、林地、牧草地的土壤 pH 显著低于盐荒地,土壤盐分离子含量也均不同程度地低于盐荒地,这对该区域盐碱地的改良、合理灌溉、科学施肥以及农业高效发展均有非常重要的意义。

(4)不同土地利用方式土壤全盐量与 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 相关性最强,说明 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 对区域盐分组成具有重要作用;土壤 pH 与 CO_3^{2-} 、 $\text{K}^{+} + \text{Na}^{+}$ 相关性较大;土壤碱化度与 pH、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^{-} 差异达极显著水平,说明碳酸盐、重碳酸盐是控制区域土壤发生碱化的主导因子;可将全盐量、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、总碱度、pH 作为不同利用方式盐碱化土壤盐碱状况的特征因子。

参考文献:

- [1] 徐恒刚.中国盐生植被及盐渍化生态治理[M].北京:中国农业科学技术出版社,2005:5.
- [2] 张杰.大庆地区土壤理化性质及盐碱化特征评价[D].哈尔滨:东北林业大学,2010.
- [3] 塔西甫拉提·特依拜,张飞,丁建丽,等.干旱区典型绿

洲盐渍化土壤空间信息研究[J].干旱区地理,2007,30(4):544-551.

[4] Chen W P, Hou Z N, WU L S, et al. Evaluating salinity distribution in soil irrigated with saline water in arid regions of northwest China[J].Agricultural Water Management,2010,97(2):2001-2008.

[5] 景宇鹏,段玉,妥德宝,等.河套平原弃耕地土壤盐碱化特征[J].土壤学报,2016,53(6):1410-1420.

[6] 侯玉明,王刚,王二英,等.河套灌区盐碱土成因、类型及有效的治理改良措施[J].现代农业,2011(1):92-93.

[7] 韩桂红,塔西甫拉提·特依拜,买买提·沙吾提,等.基于典范对应分析的干旱区春季盐渍化特征研究[J].土壤学报,2012,49(4):681-687.

[8] 樊丽琴,杨建国,许兴,等.宁夏引黄灌区盐化土壤盐分特征与相关性分析[J].中国土壤与肥料,2012(6):17-23.

[9] 张天举,陈永金,刘加珍.基于典范对应分析的滨海湿地土壤季节性盐渍化特征[J].生态学报,2019,39(9):3322-3332.

[10] 贡璐,韩丽,任曼丽,等.塔里木河上游典型绿洲土壤水盐空间分异特征[J].水土保持学报,2012,26(4):251-255.

[11] 王丹丹,程猛,杨瑞红,等.近 20 a 渭干河绿洲土壤盐分变化特征[J].干旱区研究,2015,32(6):1076-1081.

[12] 管孝艳,王少丽,高占义,等.盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系[J].生态学报,2012,32(4):1202-1210.

[13] 贡璐,冉启洋,张雪妮,等.塔里木河上游绿洲土壤表层盐分特征及其影响因子分析[J].环境科学研究,2013,26(6):631-636.

[14] 贡璐,刘曾媛,塔西甫拉提·特依拜.极端干旱区绿洲土壤盐分特征及其影响因素[J].干旱区研究,2015,32(4):657-662.

[15] 李志,李新国,毛东雷,等.博斯腾湖西岸湖滨带不同植被类型土壤剖面盐分特征分析[J].西北农业学报,2018,27(2):260-268.

[16] 景宇鹏.土默川平原盐渍化土壤改良前后土壤特性及玉米品种耐盐性研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2014:4-17.

[17] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000:152-200.

[18] 呼和浩特市农业区划办公室.呼和浩特市土壤[M].呼和浩特:内蒙古大学出版社,1991:94-95.

[19] 李彬,王志春.松嫩平原苏打盐渍土碱化特征与影响因素[J].干旱区资源与环境,2006,20(6):183-191.

[20] 张晓光,黄标,梁正伟,等.松嫩平原西部土壤盐碱化特征研究[J].土壤,2013,45(2):332-338.

[21] 王合云,李红丽,董智,等.滨海盐碱地不同造林树种林地土壤盐碱化特征[J].土壤学报,2015,52(3):706-712.

[22] 桂东伟,穆桂金,雷加强,等.干旱区农田不同利用强度下土壤质量评价[J].应用生态学报,2009,20(4):894-900.

[23] 杨劲松,姚荣江,王相平,等.河套平原盐碱地生态治理和生态产业发展模式[J].生态学报,2016,36(22):7059-7063.

[24] 王雪梅,柴仲平,塔西甫拉提·特依拜.渭干河—库车河三角洲绿洲表层土壤盐分空间异质性分析[J].干旱区资源与环境,2012,26(5):88-93.

[25] 王丹丹,于志同,程猛,等.渭干河绿洲不同土地利用类型土壤盐分的变化特征分析[J].干旱区地理,2018,41(2):349-357.

(上接第 353 页)

[13] 罗固源,卜发平,许晓毅,等.生态浮床的去污效果与机理研究[J].四川大学学报(工程科学版),2009,41(6):111-116.

[14] 虞开森,张书农,郑英铭.厌氧水质模型初探[J].上海环境科学,1990(1):10-14.

[15] 周晓红,王国祥,冯冰冰,等.3 种景观植物对城市河道污染水体的净化效果[J].环境科学研究,2009,22(1):108-113.

[16] 张景雯,田如男.四种植物对模拟的城市景观污水的净化效果[J].湿地科学,2018,16(1):85-92.

[17] 卢少勇,黑臭水体治理技术及典型案例[M].北京:化学工业出版社,2019.

[18] 张志勇,郑建初,刘海琴,等.凤眼莲对不同程度富营养化水体氮磷的去除贡献研究[J].中国生态农业学报,2010,18(1):152-158.

[19] 卢少勇,金相灿,余刚.人工湿地的氮去除机理[J].生态学报,2005,26(8):2670-2677.

[20] Fennessy M S, Cronk J K, Mitsch W J. Macrophyte productivity and community development in created freshwater wetlands under experimental hydrological conditions[J].Ecological Engineering,1994,3(4):469-484.

[21] 张鸿,陈光荣,吴振斌,等.两种人工湿地中氮、磷净化率与细菌分布关系的初步研究[J].华中师范大学学报(自然科学版),1999,33(4):575-578.

[22] 葛滢,王晓月,常杰.不同程度富营养化水中植物净化能力比较研究[J].环境科学学报,1999,19(6):690-692.

[23] 周林飞,赵言稳,关秀婷.6 种水生植物腐烂过程中水质理化指标的变化室内模拟研究[J].湿地科学,2016,14(6):832-839.