

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2026.01.037

CSTR:32310.14.stbxb.2026.01.037

代虎明,陈壹铭,吴宗盛,等.河西走廊荒漠绿洲过渡带不同土地利用方式下土壤盐碱化特征[J].水土保持学报,2026,40(1):352-362.

DAI Huming, CHEN Yiming, WU Zongsheng, et al. Characteristics of Soil salinization-alkalization under different land use types in desert-oasis ecotone of Hexi Corridor[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(1):352-362.

## 河西走廊荒漠绿洲过渡带不同土地利用方式下土壤盐碱化特征

代虎明<sup>1</sup>, 陈壹铭<sup>1</sup>, 吴宗盛<sup>1</sup>, 袁梦<sup>1</sup>, 马静<sup>1</sup>,  
赵永华<sup>2</sup>, 单立山<sup>1</sup>, 解婷婷<sup>1</sup>, 何彩<sup>3</sup>

(1.甘肃农业大学林学院,兰州730070;2.长安大学土地工程学院,  
西安710054;3.武威市林业科学研究院,甘肃武威733000)

**摘要:** [目的] 探究河西走廊荒漠绿洲过渡带不同土地利用方式下土壤盐碱化分异特征,进一步完善该领域系统性研究的不足,为筛选抑盐减碱最优管理模式和边际土地的改良与可持续利用提供科学依据。[方法] 通过野外调查取样和室内分析相结合的方法,对4种不同土地利用方式下(未利用地、草地、耕地、林地)0~20 cm土层的土壤酸碱度(pH)、电导率(EC)、全盐量(TSC)、总碱度(TA)、碱化度(ESP)、水溶性盐分离子组成等指标进行测定,并进行主成分和相关性分析。[结果] 1)研究区土壤平均pH为8.69,整体呈碱性,变异性较弱(CV<10%),不同土地利用方式下土壤的TSC表现为未利用地(3.52 g/kg)>草地(2.34 g/kg)>耕地(1.27 g/kg)>林地(1.14 g/kg),呈中等变异(10%<CV<100%),而ESP和EC均表现为未利用地>草地>林地>耕地。2)各土地利用方式下盐分离子中阳离子均以Na<sup>+</sup>为主,占阳离子总量的88.06%~93.30%,阴离子以Cl<sup>-</sup>为主,占阴离子总量的44.22%~51.75%,但耕地中以SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>为主,占阴离子总量的48.58%;除HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>外,其余离子表现为中等变异(10%<CV<100%),导致其空间分布具有较高的异质性。3)除HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>外,TSC与其余主要盐分离子呈极显著正相关( $p<0.01$ ),而TA与HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>呈极显著正相关( $p<0.01$ );TSC、TA、Ca<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、pH为研究区土壤盐碱状况的特征因子。[结论] 在自然和人为因素的双重驱动下,不同土地利用方式下土壤盐碱化特征存在显著差异,未利用地TSC、ESP、EC等盐碱化指标均显著高于其余利用方式土地,其盐碱化程度更为严重,而草地、耕地和林地等人为管理频繁的土地,盐碱化程度则相对较轻。研究结果可为河西走廊地区边际土地的可持续利用与规划管理提供科学依据。

**关键词:** 土地利用方式;河西走廊;盐碱化特征;边际土地;主成分分析

中图分类号:S156.4

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2026)01-0352-11

## Characteristics of Soil Salinization-Alkalization Under Different Land Use Types in Desert-Oasis Ecotone of Hexi Corridor

DAI Huming<sup>1</sup>, CHEN Yiming<sup>1</sup>, WU Zongsheng<sup>1</sup>, YUAN Meng<sup>1</sup>, MA Jing<sup>1</sup>,  
ZHAO Yonghua<sup>2</sup>, SHAN Lishan<sup>1</sup>, XIE Tingting<sup>1</sup>, HE Cai<sup>3</sup>

(1.College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2.School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3.Wuwei Academy of Forestry, Wuwei, Gansu 733000, China)

**Abstract:** [Objective] To investigate the differentiation characteristics of soil salinization under different land use types in the desert-oasis ecotone of the Hexi Corridor and address gaps in systematic research in this field, thereby providing a scientific basis for identifying optimal salt-suppression and alkali-reduction management practices, as well as for the improvement and sustainable utilization of marginal land. [Methods] Field survey sampling and laboratory analysis were

收稿日期:2025-08-05

修回日期:2025-09-12

录用日期:2025-10-15

网络首发日期(www.cnki.net):2025-11-11

资助项目:国家自然科学基金项目(U23A2061,32160253);甘肃省重点研发计划项目(24YFFH002,22YF7FA117);甘肃省科技重大专项计划项目(22ZD6FA052)

第一作者:代虎明(1998—),男,硕士研究生,主要从事荒漠绿洲过渡带盐碱地生态修复研究。E-mail:1280695190@qq.com

通信作者:单立山(1975—),男,博士,教授,主要从事干旱荒漠区植物水分生理生态、植物功能性状和植被恢复技术研究。E-mail:shanls@gsau.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

integrated to measure soil pH, electrical conductivity (EC), total salt concentration (TSC), total alkalinity (TA), exchangeable sodium percentage (ESP), and the composition of water-soluble salt ions in the 0-20 cm soil layer under four land use types (unused land, grassland, cropland, and forest land). Principal component analysis (PCA) and correlation analysis were applied to these indicators. [Results] 1) The average soil pH in the study area was 8.69, indicating overall alkalinity with low variability (coefficient of variation,  $CV < 10\%$ ). TSC across land uses followed the order: unused land (3.52 g/kg) > grassland (2.34 g/kg) > cropland (1.27 g/kg) > forest land (1.14 g/kg), showing moderate variability ( $10\% < CV < 100\%$ ). ESP and EC both followed the trend: unused land > grassland > forest land > cropland. 2) Among salt ions,  $\text{Na}^+$  was the dominant cation across all land uses, accounting for 88.06%—93.30% of total cations.  $\text{Cl}^-$  was the primary anion (44.22%—51.75% of total anions), except in cropland, where  $\text{SO}_4^{2-}$  dominated (48.58%). All ions except  $\text{HCO}_3^-$  showed moderate variability ( $10\% < CV < 100\%$ ), resulting in a high degree of spatial heterogeneity in their distribution. 3) TSC exhibited extremely significant positive correlations ( $p < 0.01$ ) with all major salt ions except  $\text{HCO}_3^-$ , while TA showed an extremely significant positive correlation with  $\text{HCO}_3^-$  ( $p < 0.01$ ). TSC, TA,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , and pH were identified as characteristic factors of soil salinity-alkalinity status. [Conclusion] Under the combined influences of natural and anthropogenic factors, soil salinization characteristics vary significantly across different land use types. Unused land had significantly higher values of TSC, ESP, EC, and other salinization indicators compared to other land use types, indicating more severe salinization. In contrast, lands under frequent human management (grassland, cropland, forest land) show relatively milder salinization. The findings provide a scientific basis for the sustainable utilization and management planning of marginal land in the Hexi Corridor.

**Keywords:** land use types; Hexi Corridor; salinization characteristics; marginal land; principal component analysis (PCA)

Received: 2025-08-05

Revised: 2025-09-12

Accepted: 2025-10-15

Online(www.cnki.net): 2025-11-11

边际土地是指在强烈的土壤障碍因子限制、水热资源约束或地形条件局限下,农业产能和经济效益低下、生态脆弱的土地,其中,盐碱地是边际土地的重要类型,其以土壤盐分质量分数高、碱化度强为主要特征。我国边际土地面积约  $0.78 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ,是保障我国粮食安全的战略后备耕地资源<sup>[1]</sup>。但随着气候变化和人类干预的加剧,土壤盐碱化成为威胁边际土壤质量的最主要因素之一,且其过程正变得日趋复杂,该问题在干旱、半干旱地区表现得尤为普遍<sup>[2]</sup>。河西走廊地处我国西北内陆,既是我国西北重要的商品粮基地和农副产品生产基地,同时也是关键的生态屏障,其边际土地资源丰富,然而,其属于干旱半干旱地区,降水稀少而蒸发强烈,叠加高强度人为干扰,自然与人为因素共同导致土壤盐碱化问题突出<sup>[3]</sup>,是严重制约此区域边际土地资源高效利用的主要障碍因子<sup>[4]</sup>,因此,对比不同土地利用方式下的土壤盐碱化特征差异,能为河西走廊未利用地(边际土地)的生态利用与可持续经营提供理论指导和实践依据,而掌握该信息是实现此目标的关键。

近年来,国内外学者从不同角度对多区域盐碱化土壤开展大量研究表明,不同生境下土壤盐碱化的成因有所不同;滨海盐碱地研究<sup>[5]</sup>普遍发现,长期的海水

侵蚀、蒸发作用、地下水位较浅且矿化度高及不合理的人为农业活动是导致滨海盐碱化程度加剧的主要因素;而在干旱区,降水稀少、蒸发强烈及频繁的农业活动则被认为是土壤盐碱化的主要驱动因素<sup>[6]</sup>。已有研究<sup>[7]</sup>发现,不同土地利用方式显著影响土壤盐碱化特征,其中,土壤全盐质量分数(TSC)均在未利用地或荒地中最高,且与其余利用方式土地差异显著;土壤水溶性盐离子质量分数和分布在不同土地利用方式下表现不同,土壤盐分阳离子主要以  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  为主,阴离子主要以  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$  为主<sup>[8]</sup>,但也有研究<sup>[9]</sup>发现,阳离子以  $\text{Ca}^{2+}$  为主,阴离子以  $\text{HCO}_3^-$  为主,而  $\text{CO}_3^{2-}$  质量分数较低<sup>[10]</sup>。土壤盐碱指标和盐离子变异性主要受人为活动和自然因素的共同影响<sup>[8]</sup>,不同的盐离子变异性不同,但整体上表现为中等变异或强变异,变异性较为复杂<sup>[11]</sup>。在盐离子和盐碱指标相关性方面,研究<sup>[12]</sup>发现,TSC与各盐离子相关性较强,但与  $\text{HCO}_3^-$  相关性不显著或较弱。对于土壤盐碱化特征因子方面,有研究<sup>[13]</sup>发现,TSC、总碱度(TA)、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{HCO}_3^-$  等常为不同区域土壤盐碱化的特征因子。导致土壤发生盐碱化的原因众多,其中,人类对于土地的利用方式和管理措施是致使土壤发生盐碱化和影响盐离子组成与分布的重要因素<sup>[14]</sup>。目前,我

国西北干旱区土地资源相对丰富,但大量为边际土壤,不同利用方式下其盐碱化程度差异显著,基于大尺度西北干旱区不同土地利用方式下土壤盐碱化特征的系统性研究,能为合理规划和开发边际土壤、掌握农业土壤的后备耕地资源具有重要意义。

河西走廊属于我国西北干旱区受气候状况和土壤盐碱化影响的典型边际土壤聚集区,其各种盐碱程度的土地广泛分布<sup>[1]</sup>。然而,以往针对河西走廊土地盐碱化问题的研究<sup>[3,15]</sup>主要聚焦于水盐运移、驱动因素及耐盐碱植物筛选与生物改良技术领域,研究范围多局限于小尺度区域且多以灌区、田块或单一盐渍土类型为对象,而基于大尺度不同土地利用方式下土壤盐碱化特征的研究,尤其是边际土地盐分离子组成与分布的系统性研究,在该地区仍相对匮乏。现有针对该区域的盐碱化分区研究多依赖多源遥感与电磁感应技术<sup>[16]</sup>,虽已实现按盐化程度进行空间划分,但普遍侧重于土壤盐分总量的分级,未能充分考虑盐碱离子组成类型及主导成因的差异,致使改良措施针对性不足。基于此,本研究通过对河西走廊不同土地利用方式(未利用地(边际土地)、草地、耕地、林地)下土壤的盐碱化特征进行分析,旨在探讨不同土地利用方式下土壤盐碱化的基本特征、土壤各盐分离子的组成与分布差异、致使区域发生盐碱化的特征因子及各盐碱指标间的相关性,研究结果可为河西走廊地区人类对于边际土地的合理利用、土地资源的可持续发展、区域环境问题的改善提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

河西走廊位于甘肃省西北部,是一个呈西北-东南走向的狭长地带,研究区样点主要涉及武威市(36°29′~39°27′N, 101°49′~104°16′E)、金昌市(37°40′~38°52′N, 101°48′~103°38′E)、张掖市(37°51′~39°53′N, 97°23′~102°37′E)、酒泉市(38°09′~42°48′N, 92°20′~100°20′E)(图1)。河西走廊地区属于大陆性干旱荒漠气候,具有冬季寒冷、夏季炎热,降雨量稀少,风力强盛,蒸发量大等特点,降水主要集中在5~9月,年降水量约150~200 mm,呈自东向西逐渐减少趋势,年蒸发量普遍为2 000~3 000 mm,年平均气温为5.86℃,年温差和日温差大,年日照时长约为2 550~3 500 h,光照资源丰富;研究区土壤整体呈碱性,土壤以灰棕荒漠土、灌漠土、盐渍土为主,植被覆盖度较小,自然植被多以旱生植物为主,主要的代表植物有红砂(*Reaumuria songarica*)、珍珠柴(*Caroxylon passerinum*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)、芦苇

(*Phragmites australis*)、碱蓬(*Suaeda glauca*)、骆驼蓬(*Peganum harmala*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、盐爪爪(*Kalidium foliatum*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)、紫菀木(*Asterothammus alyssoides*)、霸王(*Zygophyllum xanthoxylum*)、冰草(*Agropyron cristatum*)等。

### 1.2 土壤样品采集

该研究采用室内和野外结合的方法进行研究点位的布局 and 确定,在采样前,利用遥感数据并结合NDVI指数进行采样点的预布设,并根据《土地利用现状分类》<sup>[17]</sup>将研究区的土地利用方式划分为未利用地[边际土地,人为干预较小,植被以红砂、盐爪爪等矮小灌木和猪毛菜、雾冰藜(*Grubovia dasyphylla*)等1 a生草本为主]、草地[以具有普遍性的沙化草地为主,代表性草本植物以猪毛菜、骆驼蓬、冰草、雾冰藜、蛛丝蓬(*Halogeton arachnoideus*)等为主,盖度为21.3%~50.1%]、耕地[主要农作物以玉米(*Zea mays*)为主]、林地(主要以梭梭人工固沙林为主),每个样点具体的土地利用方式根据在采样时实际调查情况加以确定,最后确定总采样点205个(图1),其中未利用地93个、草地36个、耕地43个、林地33个。野外采样于2024年8—9月进行,每个采样点设置1个10 m×10 m的大样方,沿样方对角线等间距确定3个取样点位,分别取0~20 cm土层土样,然后将其混匀装袋,即为1个样点的土样;同时在样方内采用梅花五点定位法,分别在样方的4个顶点和中心位置设置1 m×1 m小样方,进行样方内植被的调查。所有样品带回实验室后自然风干,并去除植物根系和碎石,过2、0.25 mm筛后,封存用于土壤理化性质测定。

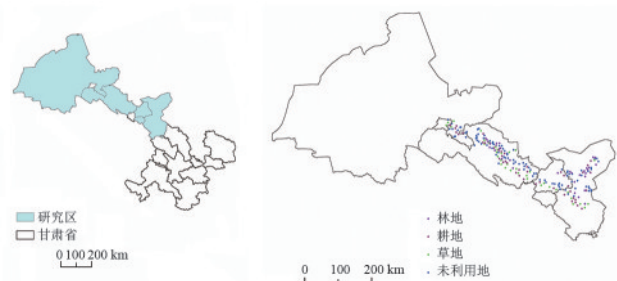


图1 研究区及样点分布

Fig. 1 Schematic diagram of study area and sampling point distribution

### 1.3 指标测定

土壤EC采用电极法测定(土水比1:5)<sup>[18]</sup>;土壤pH采用电位法测定(土水比1:2.5)<sup>[18]</sup>;可溶性盐离子质量分数采用土水比1:5浸提的方法测定<sup>[19]</sup>;SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>采用EDTA间接滴定法测定;Ca<sup>2+</sup>和Mg<sup>2+</sup>采用EDTA络合滴定法测定;HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>和CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>采用双指示剂中和滴定法测定;Cl<sup>-</sup>采用AgNO<sub>3</sub>滴定法测定;Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>采用火焰光度计法测定;阳离子交换量采用

EDTA-乙酸铵盐交换法测定;土壤交换性钠离子采用乙酸铵-氢氧化铵交换-火焰光度法测定。

### 1.4 数据处理

试验数据采用Excel 2019软件进行初步整理,然后采用SPSS 26软件统计分析进行单因素方差分析(one-way analysis of variance, ANOVA)和主成分分析(principal component analysis, PCA)。采用Origin 2021软件进行图形绘制和各盐分指标相关性分析;选择TSC、TA、ESP、pH、EC 4种盐分阳离子、3种盐分阴离子等12个变量进行主成分分析,按照累计贡献率>75%、特征值>1来确定主成分个数,同时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。土壤全盐量(TSC, g/kg)、碱化度(ESP,%)、总碱度(TA, cmol/kg)、变异系数(CV,%)的计算公式为:

$$TSC = W_{Ca^{2+}} + W_{Mg^{2+}} + W_{K^+} + W_{Na^+} + W_{CO_3^{2-}} + W_{HCO_3^-} + W_{SO_4^{2-}} + W_{Cl^-} \quad (1)$$

$$ESP = \frac{ES}{CEC} \times 100\% \quad (2)$$

$$TA = W_{CO_3^{2-}} + W_{HCO_3^-} \quad (3)$$

$$CV = \frac{SD}{M} \times 100\% \quad (4)$$

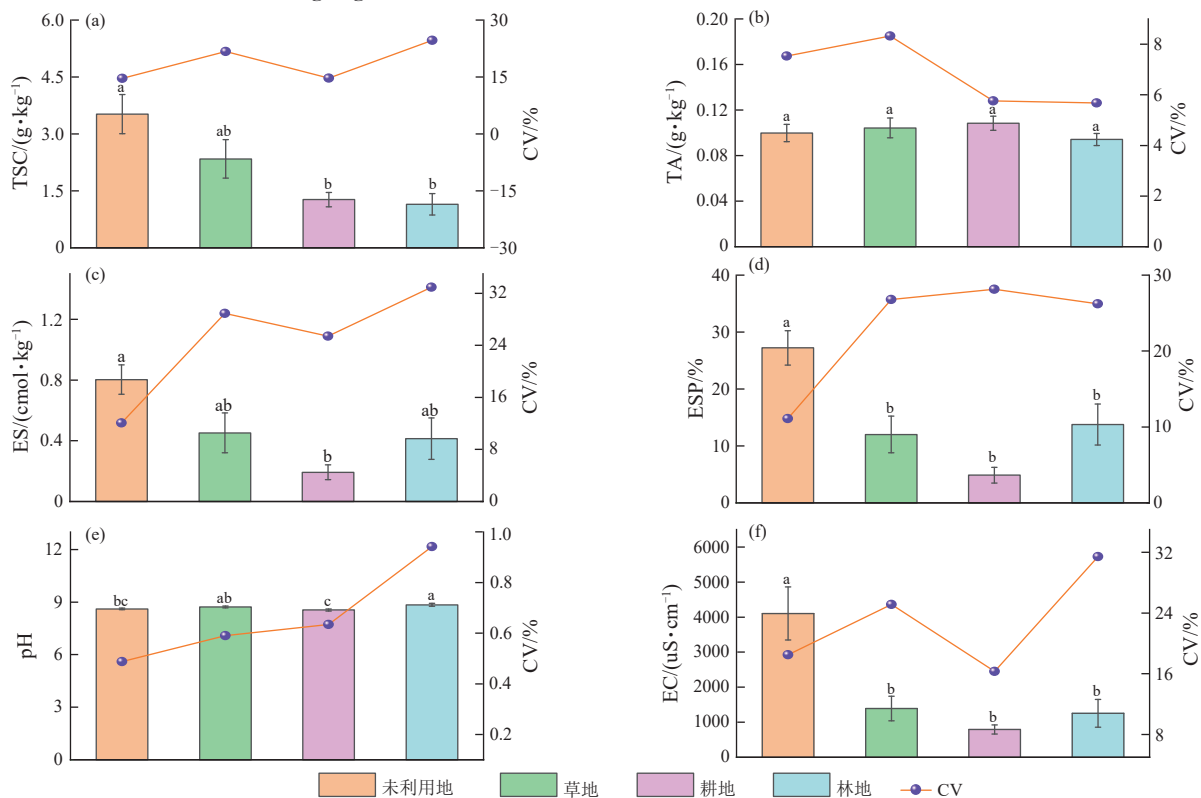
式中:W为盐分离子质量分数,g/kg;ES为交换性钠离

子,cmol/kg;CEC为阳离子交换量,cmol/kg;SD为标准偏差;M为平均值;CV≤10%为弱变异性;10%<CV<100%为中等变异性;CV≥100%为强变异性<sup>[11]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同土地利用方式下土壤盐碱化特征分析

由图2可知,未利用地、草地、耕地、林地的土壤平均TSC分别为3.52、2.34、1.27、1.14 g/kg,且未利用地显著高于耕地和林地( $p<0.05$ ),CV为14.69%~24.68%,属中等变异;未利用地、草地、耕地、林地的平均TA分别为0.10、0.11、0.11、0.09 cmol/kg, CV均<10%,属于弱变异;未利用地土壤交换性钠离子(ES)最高(0.80 cmol/kg),其次为草地和林地(0.45、0.41 cmol/kg)、耕地最小(0.19 cmol/kg),且未利用地显著高于耕地( $p<0.05$ ),CV为12.08%~32.92%,属于中等变异;未利用地、草地、耕地和林地的平均ESP分别为27.23%、12.01%、4.87%、13.77%,未利用地的ESP显著高于草地、林地和耕地( $p<0.05$ ),CV为11.10%~28.13%,为中等变异;各土地利用方式平均pH为8.56~8.73,整体呈碱性, CV均<10%,为弱变异;土壤平均EC在不同土地利用方式间差异显著,未利用地显著高于其他3种土地利用方式( $p<0.05$ ), CV为16.30%~31.44%,属于中等变异。



注: TSC为总盐质量分数;TA为总碱度;ES为交换性钠离子;ESP为碱化度;EC为电导率;图柱上方不同小写字母表示不同土地利用方式间差异显著( $p<0.05$ )。下同。

图 2 不同土地利用方式下土壤盐碱化指标

Fig. 2 Soil salinization indicators under different land use types

2.2 不同土地利用方式土壤盐分离子分布特征

盐分离子分布特征见图 3 和图 4。不同土地利用方式下主要盐分离子组成相同,阳离子均以 Na<sup>+</sup> 为主,占阳离子总量的 88.06%~93.30%,其次是 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>;阴离子除耕地外,均以 Cl<sup>-</sup> 为主,占阴离子总量的 44.22%~51.75%,其次是 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>,CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 质量分数最小,耕地土壤的阴离子以 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 为主,占阴离子总量的 48.58%,其次是 Cl<sup>-</sup> 和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>,CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 质量分数最小;同一盐分离子在不同利用方式下的分布状况有差异,未利用地中 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup> 和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 质量分数均显著高于其余利用土地 (*p*<0.05),未利用地和草地中 Na<sup>+</sup> 质量分数显著高于耕地和林地 (*p*<0.05),耕地的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 显著高于林地 (*p*<0.05)。从所有盐分离子的变异

趋势分析(图 5),在不同利用方式土地中,HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的 CV 均<10%,属于弱变异性,其余离子的 CV 均为 10%~100%,属于中等变异性;在不同利用方式土地中 4 种阴离子的变异系数小于阳离子,Cl<sup>-</sup> 和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的变异系数均在林地中最大,在未利用地中最小;CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 表现为耕地中最大,林地中最小;HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 表现为草地最大,耕地最小。同一阳离子在不同土地利用方式下的变异性差异较大,K<sup>+</sup> 和 Na<sup>+</sup> 在不同土地利用方式中呈相似的变化趋势,均表现为林地>草地>耕地>未利用地;Mg<sup>2+</sup> 的变异性在草地中最大,在耕地中最小;Ca<sup>2+</sup> 的变异性在林地中最大,未利用地中最小;从整体来看,除 Mg<sup>2+</sup>、CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 外,其他离子在林地中的变异性均最大。

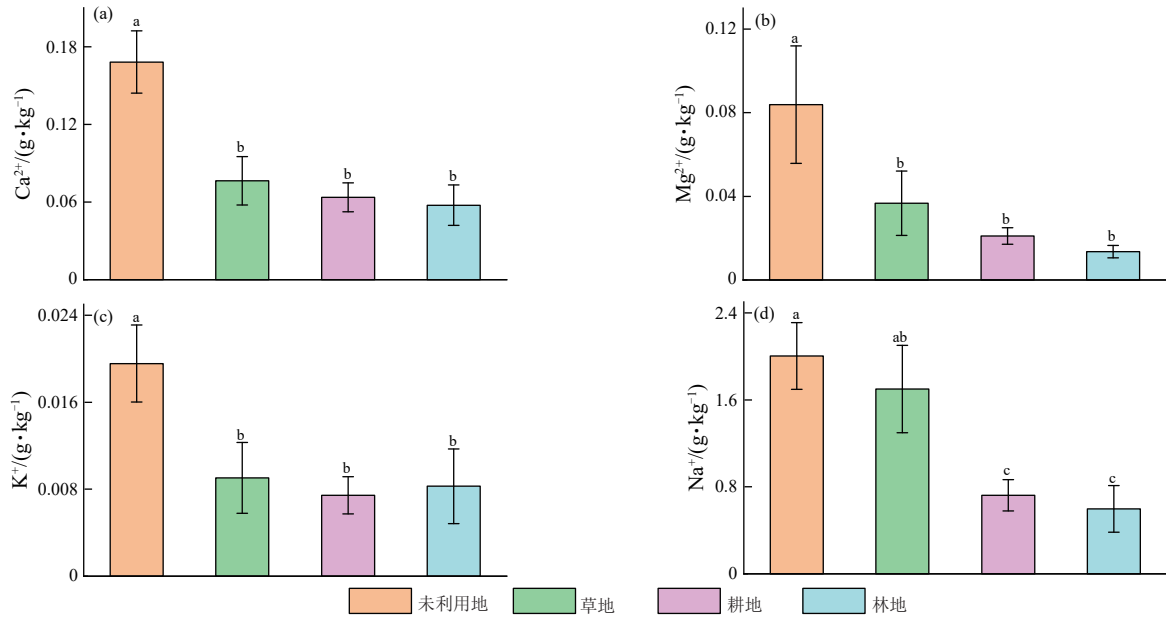


图 3 不同土地利用方式下盐分阳离子分布特征

Fig.3 Distribution characteristics of salt cations under different land use types

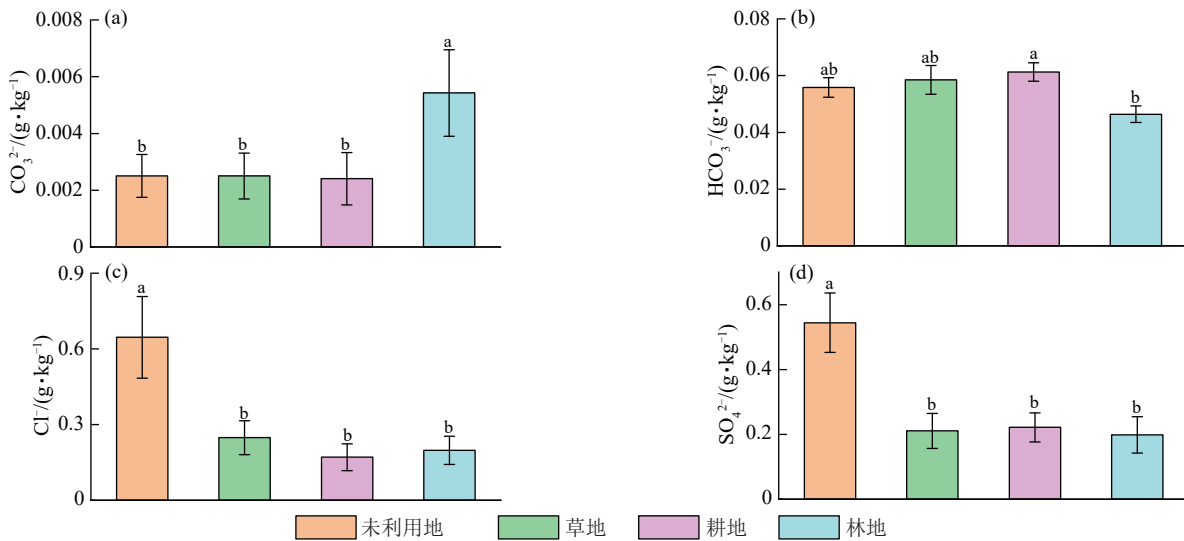


图 4 不同土地利用方式下盐分阴离子分布特征

Fig. 4 Distribution characteristics of salt anions under different land use types

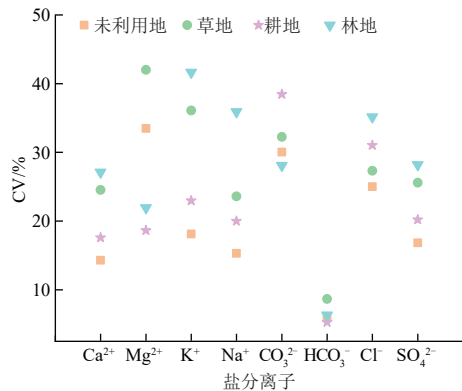


图 5 不同土地利用方式下盐分离子变异系数

Fig. 5 Coefficients of variation for salt ions under different land use types

2.3 影响土壤盐碱化程度的各指标的主成分分析

由主成分分析结果(表 1 和图 6)可知,前 3 个主成分的特征值均 >1, 分别为 5.981、1.877、1.176, 所对应的贡献率分别为 49.845%、15.643%、9.798%, 累计贡献率 75.286%;主成分因子载荷是主成分因子

表 1 主成分因子的载荷矩阵和得分系数矩阵

Table 1 Loading matrix and score coefficient matrix of principal component factors

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
TSC	0.418	0.859	-0.044	-0.104	0.363	-0.021
ESP	0.395	0.643	0.012	-0.040	0.244	0.013
pH	-0.806	0.141	0.171	-0.386	0.344	0.050
EC	0.689	0.506	-0.030	0.129	0.069	0.007
TA	-0.179	-0.041	0.948	-0.017	0.015	0.502
Ca <sup>2+</sup>	0.851	0.370	-0.156	0.237	-0.061	-0.050
Mg <sup>2+</sup>	0.692	0.356	0.104	0.186	-0.023	0.082
K <sup>+</sup>	0.669	0.409	0.129	0.160	0.015	0.094
Na <sup>+</sup>	0.062	0.888	-0.050	-0.268	0.497	-0.042
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.079	-0.010	0.944	0.083	-0.051	0.512
Cl <sup>-</sup>	0.569	0.497	0.022	0.083	0.101	0.029
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.808	0.365	-0.065	0.225	-0.052	-0.003
特征值	5.981	1.877	1.176	—	—	—
贡献率/%	49.845	15.643	9.798	—	—	—
累计贡献率/%	49.845	65.488	75.286	—	—	—

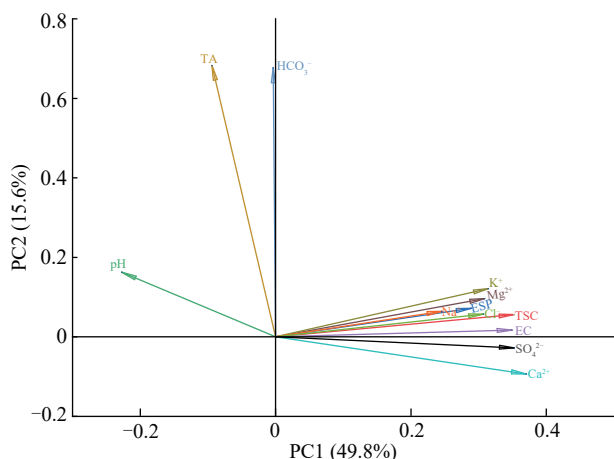


图 6 主成分载荷

Fig.6 Principal component loading plot

2.4 不同土地利用方式土壤盐碱指标间的相关性

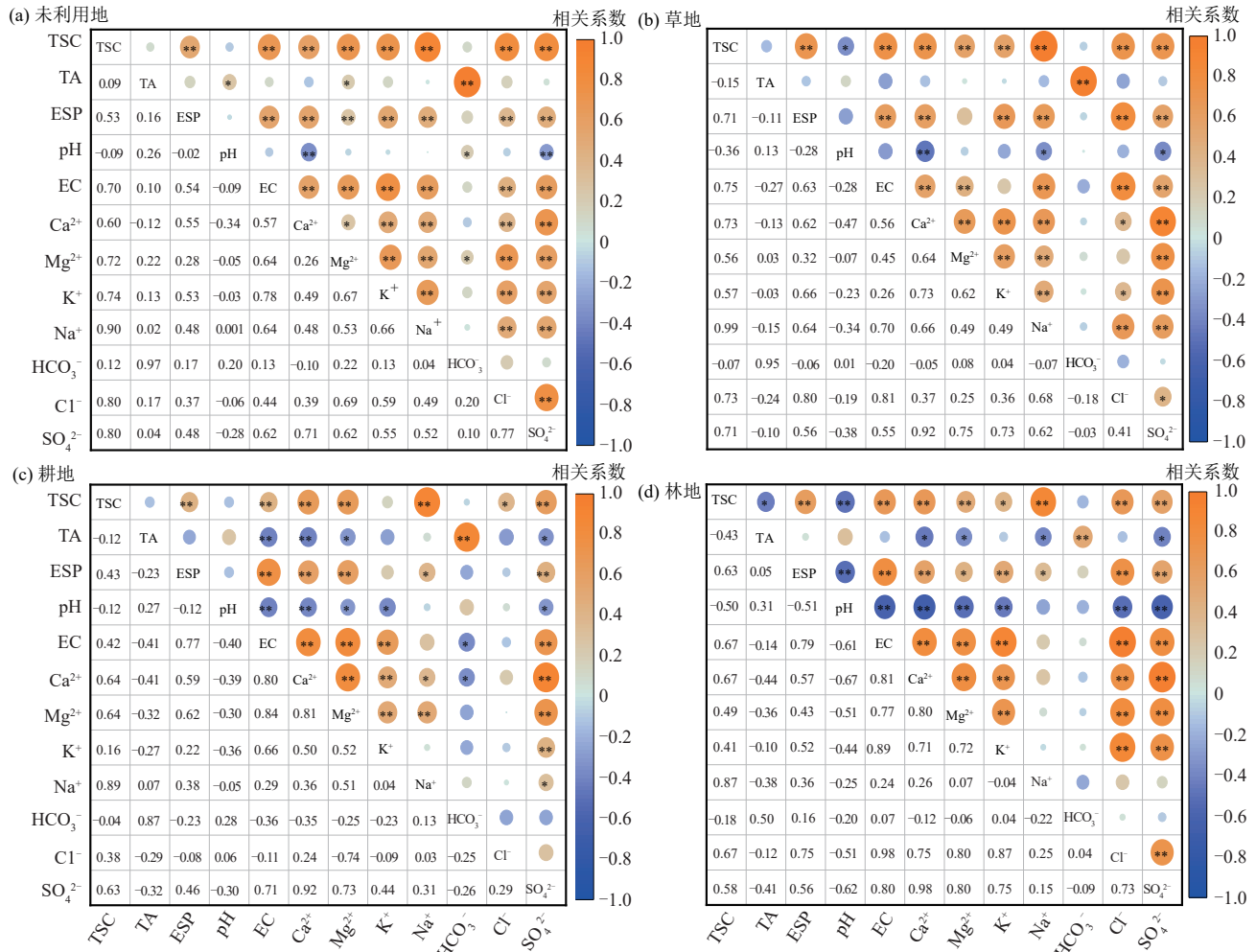
由相关性分析结果(图 7)可知,林地中 TSC 与

与原始变量因子间的相关系数,从主成分载荷矩阵来看,与第 1 主成分密切相关的是 Ca<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Mg<sup>2+</sup> 和 pH,同时 Ca<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Mg<sup>2+</sup> 与第 1 主成分有较高的正载荷,得分分别为 0.237、0.225、0.186,但 pH 与第 1 主成分有较高的负载荷;与第 2 主成分密切相关的是 TSC、Na<sup>+</sup>,且与第 2 主成分有较高的正载荷,得分分别为 0.363、0.497;Ca<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、TSC、pH 是土壤盐化的重要指标,所以第 1 主成分和第 2 主成分替代 12 个原始因子中的 Ca<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、TSC、pH 6 个因子的作用,可综合反映出土壤的盐化特征;与第 3 主成分密切相关的是 TA 和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>,并且有较高的正载荷,得分为 0.502、0.512,第 3 主成分替代 12 个原始因子中的 TA 和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 因子的作用,可综合反映出土壤碱化的特征。因此,根据各指标与各主成分间的相关性显著程度,可将 TSC、Ca<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、TA、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、pH 作为研究区盐碱化土壤盐碱状况的特征因子。

TA 呈显著负相关 ( $p < 0.05$ ),而在其余利用方式土地中,TSC 与 TA 均无相关性;4 种土地利用方式下,TSC 与 ESP 和 EC 均呈极显著正相关 ( $p < 0.01$ );在草地和林地中,TSC 与 pH 呈显著负相关 ( $p < 0.05$ ),而在未利用地和耕地中,TSC 与 pH 无相关性;不同土地利用方式下,TSC 与除 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 外的各盐离子呈极显著正相关 ( $p < 0.01$ );而 TA 在不同土地利用方式下均与 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 呈极显著正相关 ( $p < 0.01$ );除 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>,4 种土地利用方式下 ESP 与各盐离子呈极显著正相关 ( $p < 0.01$ ),但在耕地中,ESP 与 K<sup>+</sup> 和 Cl<sup>-</sup> 的相关性不显著;4 种土地利用方式下,pH 与 Ca<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 均呈极显著正相关 ( $p < 0.01$ );EC 与各盐离子的相关性和 TSC 与各盐离子的相关性表现相同,除 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、EC 与其

余盐离子呈极显著正相关( $p < 0.01$ );不同土地利用方式下,各盐分离子的相关性差异较大,在未利用地和草地中,除  $\text{HCO}_3^-$ ,其余盐离子间均呈极显著正相关( $p < 0.01$ ),在耕地和林地中,除

$\text{HCO}_3^-$ 与  $\text{Cl}^-$ ,其余盐离子间均呈极显著正相关( $p < 0.01$ ),且在草地、耕地和林地中, $\text{Ca}^{2+}$ 与  $\text{SO}_4^{2-}$ 的相关系数均达到 0.90 以上, $\text{HCO}_3^-$ 仅在耕地中与  $\text{Ca}^{2+}$ 呈显著负相关( $p < 0.05$ )。



注: \*表示在  $p < 0.05$  水平显著相关; \*\*表示在  $p < 0.01$  水平极显著相关。

图 7 不同土地利用方式下土壤盐碱指标间的相关性

Fig. 7 Correlations among soil salinization indicators under different land use types

### 3 讨论

#### 3.1 土地利用方式对土壤盐碱化基本特征的影响

不同土地利用方式下土壤盐碱化的成因复杂多样,但河西走廊干旱少雨、蒸发强烈的气候条件,构成该区域土壤盐碱化的根本自然驱动力。地下水与土壤母质中的盐分在毛细作用下运移至地表,水分蒸发后盐分析出并积累,是各土地利用类型发生盐碱化的共同基础<sup>[3]</sup>。与此同时,人为干预下的土地利用方式显著改变了该自然过程的强度与方向<sup>[6]</sup>:未利用地缺乏有效人为调控与植被缓冲,主要受强烈的自然蒸发-积盐过程主导,因此盐碱化程度最为严重。耕地的盐分状况则很大程度上受灌溉与排水措施调控,合理用水可有效控盐,反之则易加剧盐渍化。林地和草地凭借较高的植被覆盖度,有效抑制土壤水

分的直接蒸发,从而减轻盐分的表聚效应。植被凋落物归还土壤,促进有机质积累和结构改善,增强水分入渗,进一步抑制盐分向上迁移。

本研究通过分析 TSC、TA、ESP、EC、pH 及交换性钠离子等关键指标,可反映不同土地类型的盐碱化状况。本研究发现,未利用地的 TSC 质量分数最高,且显著高于耕地和林地,与牛芳鹏等<sup>[20]</sup>、翟江蕊等<sup>[21]</sup>的研究结果一致,可能是由于未利用的边际土地植被覆盖度较低,土壤水分蒸发快,盐分随水分的蒸发而聚集到表层,而草地、耕地和林地的植被覆盖度较高,减少土壤水分的蒸发,进而抑制盐分向表层土壤运移,使得其盐分质量分数较低<sup>[22]</sup>。EC 在一定程度上反映土壤盐分的质量分数,在探讨土壤盐渍化程度、肥力质量特征和污染特点等方面具有重要意义<sup>[23]</sup>,本研究发现,其在不同土地利

用方式下的变化趋势与TSC基本一致,在未利用的边际土地中最高,进一步表明未利用的边际土地具有更高的盐分累积风险,其土壤盐渍化程度相对较高。本研究发现,不同土地利用方式下土壤的TA差异不显著,但草地和耕地的TA相比于未利用地呈上升趋势,与李晓瑾等<sup>[15]</sup>研究结果相同,表明河西走廊地区不同土地利用方式下土壤中 $\text{HCO}_3^{2-}$ 和 $\text{CO}_3^{2-}$ 的总体质量分数无显著差异。而交换性钠离子质量分数与ESP在不同土地利用方式下呈一致的变化趋势,未利用的边际土地的交换性钠离子质量分数和ESP均最高,与景宇鹏等<sup>[13]</sup>对不同利用方式土壤的盐碱化特征研究结果相似,表明未利用的边际土地交换性能最强且碱化程度最高。根据我国盐碱地分类标准<sup>[24]</sup>,未利用边际土地属于强碱化土,草地和林地属于碱化土,耕地属于非碱化土。pH是评价土壤是否发生盐碱化的重要指标,研究区土壤平均pH为8.69,依据土壤酸碱性分类可知<sup>[25]</sup>,研究区土壤总体呈碱性, $\text{CV}<10\%$ ,为弱变异,与高宗军等<sup>[25]</sup>对张掖盆地北部土壤盐分特征的研究结果一致,表明河西走廊地区土壤pH基本维持在同一水平,空间变异性较小。

### 3.2 土地利用方式对盐分离子分布特征的影响

不同土地利用方式下土壤盐分离子的组成存在差异,阳离子均以 $\text{Na}^+$ 为主,其次是 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ , $\text{K}^+$ 质量分数最低,与王昊等<sup>[26]</sup>研究结果相同,而与吕真真等<sup>[9]</sup>的研究结果不一致,可能是研究地区的地理环境因素不同所致。土壤中 $\text{Na}^+$ 的质量分数较高,而 $\text{Na}^+$ 与 $\text{K}^+$ 的理化性质相似,二者存在拮抗作用,致使在土壤胶体吸附位点上发生竞争性吸附, $\text{Na}^+$ 质量分数高时会优先占据吸附位点,抑制 $\text{K}^+$ 的吸附并促进其淋溶流失,从而导致土壤溶液中可交换性 $\text{K}^+$ 质量分数较低<sup>[27]</sup>;  $\text{Mg}^{2+}$ 和 $\text{K}^+$ 的质量分数低于 $\text{Ca}^{2+}$ ,可能是由于 $\text{Mg}^{2+}$ 和 $\text{K}^+$ 比 $\text{Ca}^{2+}$ 更容易被水淋失,与丛山<sup>[28]</sup>对不同植物群落及裸地间土壤盐分离子质量分数的研究结果一致。除耕地外,阴离子均以 $\text{Cl}^-$ 为主,其次是 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{HCO}_3^-$ , $\text{CO}_3^{2-}$ 质量分数极少,主要是研究区的土壤整体呈碱性,而 $\text{CO}_3^{2-}$ 在碱性条件下易与 $\text{Ca}^{2+}$ 形成碳酸钙沉淀,且一部分 $\text{CO}_3^{2-}$ 发生水解形成 $\text{HCO}_3^-$ ,导致 $\text{CO}_3^{2-}$ 质量分数极少<sup>[10]</sup>。本研究发现,耕地土壤的阴离子以 $\text{SO}_4^{2-}$ 为主,可能是 $\text{Cl}^-$ 随水迁移的能力比 $\text{SO}_4^{2-}$ 强,而耕地土壤中灌溉水的影响,导致 $\text{Cl}^-$ 发生一定程度的迁移,致使土壤中 $\text{Cl}^-$ 比 $\text{SO}_4^{2-}$ 少,表明灌溉在一定程度上促进土壤中 $\text{Cl}^-$ 的淋溶迁移<sup>[29]</sup>。可见,不同土地利用方式下,河西走廊地区土壤中的盐均以氯化物和硫酸盐为主,而碳酸

盐质量分数相对较少,与胡志远等<sup>[30]</sup>对河套灌区土壤盐碱特征的研究结果一致,与任飞飞等<sup>[31]</sup>对西辽河平原土壤盐碱化特征的研究结果为碳酸盐有所不同,主要原因是研究地区土壤的含盐母质、地下水位、地形地貌、气候条件及人为因素对于土壤的影响不同<sup>[6]</sup>。不同土地利用方式下土壤各盐分离子的变异性不同,其中, $\text{HCO}_3^-$ 属于弱变异,其余盐分离子均属于中等变异,各盐离子空间分布较为复杂,与郭军成等<sup>[32]</sup>对宁夏银北灌区和疏勒河灌区盐分离子分布特征的研究结果有所差异,主要与研究区频繁的人为农业活动和气候有关,农业活动和干燥的气候及强烈的土壤水分蒸发加快盐分离子的积累,同时改变原有盐分离子的分布格局,在一定程度上促进其变异程度的复杂性<sup>[33]</sup>;阳离子中 $\text{Ca}^{2+}$ 的变异系数最小,是由于 $\text{Ca}^{2+}$ 多以碳酸钙的形式存在,在偏碱性条件下易淀积,随水移动的能力较弱,致使其变异性较小<sup>[18]</sup>,与康满萍等<sup>[34]</sup>对苏干湖湿地土壤盐分离子变异性的研究结果相似,表明偏碱性条件下碳酸钙沉淀过程在控制 $\text{Ca}^{2+}$ 迁移性和空间分布方面起着重要作用,使其在阳离子中表现出最低的变异程度。

### 3.3 不同土地利用方式下各盐碱指标间的相关性及盐碱化的主导因子

盐碱化土壤的形成与气候条件、地理条件、土壤条件、人为因素的影响密切相关<sup>[33]</sup>,土壤盐分离子间的相关性分析可反映出盐分在土体中的存在状态及与各主要盐分离子间的相关性<sup>[20]</sup>,不同土地利用方式下的土壤盐分离子整体上的相关性相似,只有少数指标在不同利用方式下的土壤中相关性存在差异。在不同土地利用方式下,TSC与各盐分离子的相关性均较强(除 $\text{HCO}_3^-$ ),与王战等<sup>[12]</sup>对鱼卡-大柴旦盆地土壤盐分特征的研究结果一致,表明土壤盐渍化与各盐分离子的关系较强,但与 $\text{HCO}_3^-$ 的关系较差<sup>[25]</sup>;研究区各盐分离子间大都具有一定程度的相关性,而 $\text{HCO}_3^-$ 无论在何种土地利用方式下均与其他盐分离子间的相关性较弱或无相关性,与翟江蕊等<sup>[21]</sup>对塔河地区不同土地利用类型土壤中盐分离子相关性的研究结果一致,可能是和 $\text{HCO}_3^-$ 的化学性质有关, $\text{HCO}_3^-$ 的稳定性较差,易转化为 $\text{CO}_3^{2-}$ ,而 $\text{CO}_3^{2-}$ 与 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 结合形成稳定的土壤颗粒<sup>[35]</sup>,致使与其他离子的相关性较弱,表明 $\text{HCO}_3^-$ 的增加能抑制大部分盐分离子的聚集<sup>[36]</sup>。在耕地土壤中, $\text{Cl}^-$ 与其他盐分离子的相关性均较弱,而在其他3种利用方式下的土壤中相关性较强,主要原因可能是 $\text{Cl}^-$ 的移动性较强,而河西走廊地区耕地土壤由于灌溉的影响, $\text{Cl}^-$ 发生一定程度的移动,致使与其他盐分离子的相关性较弱<sup>[29]</sup>。除耕地与林地中 $\text{K}^+$ 和

Na<sup>+</sup>无相关性外,4种盐分阳离子间的相关性均较强,与许波等<sup>[37]</sup>对高矿化度水灌溉下土壤盐分特征的研究结果相似。在阴离子中,由于Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>在土壤水吸力较大时,对HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>的解离有一定的抑制作用,致使在不同土地利用方式下土壤中盐分离子的相关性存在差异<sup>[38]</sup>。对各盐碱指标和盐分离子的主成分分析发现,与第1和第2主成分密切相关的是Ca<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、TSC、pH,而该类指标在一定程度上代表土壤盐化的程度,表明Ca<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、TSC是致使研究区土壤发生盐化的主要影响因子,与郑明等<sup>[35]</sup>、王晨晨等<sup>[18]</sup>的研究结果相似,进一步揭示土壤盐渍化是多盐离子协同作用的结果。因此,在评估土壤盐渍化时,单一指标难以全面表征,应综合考虑各因子的作用。与第3主成分密切相关的是TA与HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>,是反映土壤碱化特征的关键指标,表明HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>是控制研究区土壤碱化过程的主导因子,与钱争等<sup>[39]</sup>的研究结果一致。因此,根据各指标与各主成分间的相关性显著程度,可将TSC、TA、Ca<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、pH作为研究区盐碱化土壤盐碱状况的特征因子。

基于对河西走廊不同土地利用方式下土壤盐碱化特征及盐离子组成的分析发现,其盐碱化成因与程度存在显著差异。因此,在开发利用该类边际土地时,应摒弃“一刀切”的治理模式,遵循“分区分类、因地制宜”的原则。具体而言,对于未利用地,可优先引进并规模化种植耐旱、耐盐碱的乡土植物,通过植物根系吸收盐分及改善土壤结构,逐步降低表层土壤盐碱化程度;林地和草地区域应重点实施生态保育与恢复措施,防止因过度放牧或人为破坏导致植被退化,从而加剧土壤盐渍化进程;在耕地利用中,则需大力推广滴灌、渗灌等节水灌溉技术,并系统性完善排水设施,控制地下水位上升,从根本上避免次生盐渍化的发生<sup>[2,38]</sup>。

## 4 结论

1)研究区土壤平均pH为8.69,整体呈碱性,TSC、ESP和EC均表现为未利用地>草地>耕地/林地(其中ESP、EC为未利用地>草地>林地>耕地),且均属中等变异(10%<CV<100%)。相比未利用的边际土地,耕地和林地盐分指标显著降低,表明合理人为管理可有效调控水盐运移,促进盐分淋洗,缓解盐渍化。因此,科学开发河西走廊边际土壤是可行的盐渍化防控与增效策略。

2)不同土地利用方式下土壤盐离子组成中阳离子均以Na<sup>+</sup>为主,其次是Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>,阴离子在耕地中以SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>为主,在其他土地类型中均以Cl<sup>-</sup>为主,而

CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>在不同利用方式土地中质量分数均极少。各盐分离子的(除HCO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)均具有较强的空间变异性(10%<CV<100%),而HCO<sub>3</sub><sup>2-</sup>变异较弱(CV<10%)。

3)在4种利用方式土地中,TSC与除HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>外的其他盐离子均呈正相关,而TA与HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>呈正相关。TSC、TA、Ca<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、pH为研究区盐碱化土壤盐碱状况的特征因子,在后续相关研究中,聚焦于该类关键指标,能显著提升研究效率、精准把握区域盐碱化的主要驱动过程与特征。

## 参考文献:

- [1] 曹晓风,孙波,陈化榜,等.我国边际土地产能扩增和生态效益提升的途径与研究进展[J].中国科学院院刊,2021,36(3):336-348.  
CAO X F, SUN B, CHEN H B, et al. Approaches and research progresses of marginal land productivity expansion and ecological benefit improvement in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(3): 336-348.
- [2] XIAO Y, HU W X, ZHANG Y Q, et al. Spatiotemporal variation and driving forces of soil salinization in the lower reach of arid endorheic basins: Critical role of lake system and groundwater overflow[J]. Agricultural Water Management, 2025, 315: e109568.
- [3] 袁广祥,陈德文,朱井生,等.河西走廊水资源开发利用诱发土壤盐渍化的风险评价[J].中国农村水利水电,2021(10):162-167.  
YUAN G X, CHEN D W, ZHU J S, et al. Risk assessment of soil salinization induced by water resources development and utilization in Hexi Corridor[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(10): 162-167.
- [4] SINGH A. Soil salinity: A global threat to sustainable development[J]. Soil Use and Management, 2022, 38(1): 39-67.
- [5] 吕航,赵月,龚绪龙,等.我国滨海盐碱地改良技术综述及案例研究[J].水文地质工程地质,2025,52(2):25-43.  
LYU H, ZHAO Y, GONG X L, et al. Review of techniques and case studies for saline-alkali land amelioration in the coastal regions of China [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2025, 52(2): 25-43.
- [6] 刘丽娟,李小玉.干旱区土壤盐分积累过程研究进展[J].生态学杂志,2019,38(3):891-898.  
LIU L J, LI X Y. Progress in the study of soil salt accumulation in arid region [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(3): 891-898.
- [7] 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.  
WANG D D, YU Z T, CHENG M, et al. Characteristics of soil salinity under different land use types in Weigan River Oasis [J]. Arid Land Geography, 2018, 41(2): 349-357.

- [8] ZHANG Y T, HOU K, QIAN H, et al. Characterization of soil salinization and its driving factors in a typical irrigation area of northwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 837: e155808.
- [9] 吕真真, 刘广明, 杨劲松. 新疆玛纳斯河流域土壤盐分特征研究[J]. *土壤学报*, 2013, 50(2): 289-295.  
LÜ Z Z, LIU G M, YANG J S. Soil salinity characteristics of manas river valley in Xinjiang[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(2): 289-295.
- [10] 涂丽娜, 王绍明, 杨岩, 等. 玛纳斯河流域下游土壤的盐分特征分析[J]. *新疆农业科学*, 2011, 48(3): 565-571.  
TU J N, WANG S M, YANG Y, et al. The characteristics of soil salinity in downstream Manas River[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2011, 48(3): 565-571.
- [11] 樊丽琴, 李磊, 吴霞. 银北高水位盐碱地土壤盐分与地下水特征关系分析[J]. *节水灌溉*, 2019(6): 55-59.  
FAN L Q, LI L, WU X. Relationship between soil salinity and groundwater characteristics in saline-alkali land with high groundwater level of Yinbei irrigation area[J]. *Water Saving Irrigation*, 2019(6): 55-59, 66.
- [12] 王战, 李向全, 王振兴, 等. 青海省鱼卡-大柴旦盆地土壤盐分特征[J]. *土壤*, 2015, 47(4): 819-822.  
WANG Z, LI X Q, WANG Z X, et al. Characteristics of soil salinity in Yuka-Da Qaidam basin in Qinghai Province[J]. *Soils*, 2015, 47(4): 819-822.
- [13] 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.  
JING Y P, LIAN H F, LI Y J, et al. Analysis on the difference of soil salinization characteristics in Hetao saline-alkali soil with different land use[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(4): 354-363.
- [14] HONG M M, WANG J L, HAN B M. Spatial-temporal variation and attribution of salinization in the Yellow River basin from 2015 to 2020[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2023, 16(1): 446-463.
- [15] 李晓瑾, 郭丽琢, 高玉红, 等. 不同植物对河西盐渍土的改良效果[J]. *核农学报*, 2024, 38(12): 2442-2450.  
LI X J, GUO L Z, GAO Y H, et al. The effects of different plants on saline-alkali soil improvement in the Hexi region[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2024, 38(12): 2442-2450.
- [16] 廖杰, 文星. 基于遥感的近30年来河西地区盐碱地动态变化研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(9): 96-101.  
LIAO J, WEN X. Dynamic change of saline and alkali land in Hexi region based on remote-sensing[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, 25(9): 96-101.
- [17] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 土地利用现状分类: GB/T 21010—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Current land use classification: GB/T 21010—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [18] 王晨晨, 孙向阳, 李素艳, 等. 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 C C, SUN X Y, LI S Y, et al. Soil salinization characteristics in different land use soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023, 54(5): 1167-1175.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.  
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [20] 牛芳鹏, 李新国, 靳万贵, 等. 博斯腾湖西岸湖滨绿洲土壤盐分特征[J]. *中国土壤与肥料*, 2020(3): 8-15.  
NIU F P, LI X G, JIN W G, et al. Characteristics of soil salinity in the western lakeside oasis of Bosten Lake[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(3): 8-15.
- [21] 翟江蕊, 白云岗, 加孜拉, 等. 塔河下游典型绿洲灌区不同土地利用类型土壤的盐渍化特征[J]. *水土保持通报*, 2023, 43(3): 69-79.  
ZHAI J R, BAI Y G, JIA Z L, et al. Soil salinization characteristics of different land use types in a typical oasis irrigation area of lower Tarim River[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(3): 69-79.
- [22] YANG J X, ZHAO J, ZHU G F, et al. Soil salinization in the oasis areas of downstream inland rivers—Case Study: Minqin oasis[J]. *Quaternary International*, 2020, 537: 69-78.
- [23] 李笑雨. 青藏高原南部土壤理化特性及土壤质量评价研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.  
LI X Y. Study on soil physicochemical characteristics and soil quality assessment in the southern Qinghai-Xizang Plateau[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2023.
- [24] 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.  
JIA J, HE P, XU J, et al. Spatial distribution characteristics of soil salinity in the middle and eastern plain of Tianjin[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2021, 11(4): 711-719.
- [25] 高宗军, 任晓辉, 吴玺, 等. 张掖盆地北部地下水溢出带土壤盐分特征分析[J]. *土壤通报*, 2020, 51(4): 853-859.  
GAO Z J, REN X H, WU X, et al. Soil salinity characteristics of the groundwater spillover zone in the northern Zhangye basin[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51(4): 853-859.
- [26] 王昊, 张生银, 张顺存, 等. 干旱-半干旱区不同地质背景区典型灌区土壤盐分特征及成因对比分析[J]. *地球与环境*, 2023, 51(6): 620-632.  
WANG H, ZHANG S Y, ZHANG S C, et al. Soil salinity

- characterization and causes in irrigation areas with different geological backgrounds in arid and semi-arid regions [J]. *Earth and Environment*, 2023, 51(6):620-632.
- [27] 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.
- [28] 丛山. 不同改良技术对松嫩平原盐碱地土壤盐碱特征的影响[D]. 哈尔滨: 中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2022.
- CONG S. Effects of different amelioration techniques on soil saline-alkali characteristics in Songnen Plain [D]. Harbin: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2022.
- [29] 刘易, 冯耀祖, 黄建, 等. 微咸水灌溉条件下施用不同改良剂对盐渍化土壤盐分离子分布的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(1):146-152.
- LIU Y, FENG Y Z, HUANG J, et al. Effects of modifiers on saline soil salt distribution under brackish water irrigation conditions [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(1):146-152.
- [30] 胡智远, 史海滨, 苗庆丰, 等. 河套灌区耕地、荒地土壤盐渍化特征及其影响因素研究[J]. *灌溉排水学报*, 2024, 43(12):97-105.
- HU Z Y, SHI H B, MIAO Q F, et al. Salinization characteristics and its determinants of cultivated and uncultivated lands in the Hetao Irrigation District [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2024, 43(12):97-105.
- [31] 任飞飞, 潘洪捷, 葛伟丽, 等. 西辽河平原土壤盐渍化特征及其驱动因素分析[J]. *环境科学与技术*, 2025, 48(6):138-145.
- REN F F, PAN H J, GE W L, et al. Distribution characteristics and controlling factors of soil salinization in West Liaohe Plain [J]. *Environmental Science and Technology*, 2025, 48(6):138-145.
- [32] 郭军成, 王明国, 耿荣, 等. 宁夏银北灌区盐碱地盐渍化特征分析[J]. *中国农学通报*, 2021, 37(5):38-42.
- GUO J C, WANG M G, GENG R, et al. Salinity characteristics analysis of saline alkali soil in Yinbei irrigation district of Ningxia [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(5):38-42.
- [33] 丁邦新, 白云岗, 刘雪艳, 等. 塔里木河下游灌区春季土壤盐分空间变异特征: 以新疆第二师三十一团灌区为例[J]. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(1):209-216.
- DING B X, BAI Y G, LIU X Y, et al. Spatial variation characteristics of soil salinity in the lower reaches of the Tarim River in spring: A case study on 31th regiment of Xinjiang Second Division [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(1):209-216.
- [34] 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[J]. *生态学报*, 2022, 42(22):9026-9034.
- KANG M P, ZHAO C Z, LI Q. Characteristics of soil total salt content and its correlation with groundwater in Sugan Lake wetland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(22):9026-9034.
- [35] 郑明, 白云岗, 张江辉, 等. 基于主成分分析法的干旱区典型绿洲土壤盐分特征分析: 以新疆第二师31团为例[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(27):81-87.
- ZHENG M, BAI Y G, ZHANG J H, et al. Soil salinity characteristics of typical oasis in arid area based on principal component analysis: An example in Xinjiang [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(27):81-87.
- [36] 李杰彪, 苏锐, 周志超, 等. 甘肃北山沙枣园地区土壤表层盐分特征研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(9):115-120.
- LI J B, SU S, ZHOU Z C, et al. Analysis on characteristics of soil salinity in Shazaoyuan site of Gansu Beishan region [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(9):115-120.
- [37] 许波, 张忠良, 王永东, 等. 高矿化度水灌溉条件下土壤盐结皮层与下层土壤盐分特征差异初探[J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(7):116-120.
- XU B, ZHANG Z L, WANG Y D, et al. The variability of salt characteristics from salt crust to subsoil in the shelterbelts along Tarim desert highway [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28(7):116-120.
- [38] 郭全恩. 土壤盐分离子迁移及其分异规律对环境因素的响应机制[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- GUO Q E. The response mechanism of soil salt ions transfer and diversity rule to environment factor [D]. Yanling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2010.
- [39] 钱争, 冯绍元, 庄旭东, 等. 基于主成分分析的土壤盐碱化特征研究[J]. *中国农村水利水电*, 2022(5):119-124.
- QIAN Z, FENG S Y, ZHUANG X D, et al. Research on the soil salinization and alkalization characteristics based on principal component analysis [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2022(5):119-124.