

基于主成分分析的宁夏银北地区 龟裂碱土盐分特征研究

张体彬^{1,2}, 康跃虎¹, 胡伟¹, 窦超银³

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049
3. 辽宁省水利水电科学研究院, 辽宁 沈阳 110003)

摘要: 为探明宁夏银北地区龟裂碱土的盐分状况, 并构建滴灌利用龟裂碱土过程中具有代表性和限制性的盐分特征因子, 利用经典统计和主成分分析方法对龟裂碱土原状土剖面 and 滴灌利用下的土壤盐分特征进行了研究。结果表明, 龟裂碱土剖面盐分离子含量总体呈现“T”字型分布, 0~40 cm 土壤 SAR 值较大, 均高于 15 (mmol/L)^{0.5}, 土壤 pH 值 9.5 左右; Cl⁻ 和 Na⁺ 是该土壤中最主要的阴阳离子; HCO₃⁻ 含量在 100 cm 以下的土层中逐渐增加; 土壤可溶性总盐 (TSS) 与 Cl⁻ 和 Na⁺ 的相关性较大, 相关系数分别为 0.967 和 0.910 ($P < 0.01$), TSS 与饱和浸提液电导率 (EC_e) 亦存在着显著的正相关 ($P < 0.01$); 主成分分析表明影响土壤利用的 4 个主成分依次为土壤盐化状况、土壤结构状况、土壤碱化特征以及除 Na⁺、Mg²⁺ 和 Ca²⁺ 等离子之外的其它离子含量状况, 其累积方差贡献率为 87.18%。由此可见, 在宁夏银北地区龟裂碱土具有干旱区盐碱土壤盐分表聚特征, 在利用过程中仍需要首先降低土壤盐度, 通过改变离子组成减小土壤碱度, 改善土壤结构。

关键词: 龟裂碱土; 盐分特征; 主成分分析

中图分类号: S156.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2012)02-0039-08

当前, 全球盐渍土面积约为 1×10^9 hm², 分布在从寒带、温带至热带的各个地区, 从美洲、欧洲、亚洲到澳洲, 遍及各个大陆及亚大陆地区, 其中碱土和碱化土壤约占 60%^[1]。与盐土改良相比, 碱土的改良更为困难^[2]。龟裂碱土是一种具有不良理化性质的土壤, 主要分布于在新疆、宁夏银川平原和内蒙古河套平原的西部^[3]。对土壤盐渍化特征、剖面类型及其发展方向的定量研究是实现盐渍土科学管理及合理利用的必要前提, 另外, 近年来, 滴灌作为一种先进的节水灌溉技术, 以其独特的优势, 逐渐成为盐碱地开发利用的新途径, 得到广泛的应用^[4-6]。而盐渍化土壤积盐强度以及占优势的盐类组成随生物气候、地带性土壤的发生过程以及利用方式不同差异很大^[7], 因此有必要开展在滴灌利用条件下的龟裂碱土的盐分特征研究。

但盐渍土盐分组成的复杂性和区域性特点增加了对其进行定量研究的难度。主成分分析 (Principal component analysis, PCA) 方法是一种将多个指标化为少数几个综合指标 (即主成分) 的统计分析方法^[8], 提取出的每个主成分都是原始变量的线性组合, 且各个主成分之间互不相关, 还要尽可能多地反映原来指标的信息, 是一种有效的降维技术, 也是一

种综合评价方法^[9,10]。近年来, 利用主成分分析方法, 对土壤盐渍化程度、类型、盐渍土的分布以及土壤盐渍化发展方向的研究, 已有较多报道, 但多是关于滨海和西北地区盐化土壤类型^[11-17], 而利用主成分分析对龟裂碱土的盐分特征的研究未见报道。

为此, 本文针对龟裂碱土典型分布区域, 在野外调查、取样和化学分析的基础上, 采取经典统计和主成分分析的方法, 分析龟裂碱土的盐分状况, 构建滴灌利用龟裂碱土过程中具有代表性和限制性的盐分特征因子, 用于评价龟裂碱土的盐渍化状况, 为以后此类碱化土壤滴灌精准改良利用的可行性分析和盐渍化发展方向研究提供方法和参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验基地位于龟裂碱土的典型分布区——宁夏平罗县西大滩 (38°52' N, 106°27' E, 海拔约 1 095 m), 属于黄河中上游半干旱—半荒漠境盐渍区^[3], 位于贺兰山东麓洪积平原与黄河冲积平原过渡地带, 银川平原引黄灌区的末梢, 地形较为平坦。典型的温带大陆性气候, 全年日照充足, 温差较大, 无霜期短。年降水量为 180~220 mm 之间, 年蒸发量 2 000

收稿日期: 2011-07-05

基金项目: 中国科学院西部行动计划项目 (KZCX2-XB2-13); 中国科学院百人计划项目

作者简介: 张体彬 (1983—), 男, 山东菏泽人, 博士研究生, 从事农业水上资源高效利用研究。E-mail: zhangtubin@163.com。

通讯作者: 康跃虎, E-mail: kangyh@igsrr.ac.cn。

mm 以上,蒸降比为 10 左右,降水量的各季分配是:春季占全年降水量的 20%,夏季占 56%,秋季占 22%,冬季占 1.2%。年平均气温 9.4℃。年最低平均气温 -21.3℃,年最高平均气温 34.3℃,≥10℃积温为 3 300℃。研究区内地下水埋深为 2.5 m 左右,地下水矿化度一般小于 3 g/L,主要含硫酸盐、氯化物,且含有少量苏打(Na₂CO₃)。

境内分布有一种具有不良理化性质的土壤——龟裂碱土,宁夏群众俗称白僵土,属于盐碱土纲碱土类盐渍龟裂碱土亚类^[3,18],面积约 2 × 10⁴ hm²^[19,20]。龟裂碱土具有特殊的外部景观和剖面形态,一般不长高等植物,地面光秃。龟裂碱土表层为具有龟裂纹的结壳,结壳下为短柱状结构的碱化层,其下为棱块状结构的土层,整个剖面非常坚硬,土壤容重高达 1.40 ~ 1.67 g/cm³。土壤质地为粉质土,0 ~ 40 cm 土壤中粘粒 (< 2 μm)、粉粒 (2 ~ 50 μm)、砂粒 (> 50 μm) 分别占 1.08%、93.61% 和 5.31%。

实验基地于 2009 年开始进行开发利用研究。采用以“滴灌”为核心的利用方式,结合其他如“高垄”、“覆膜”、“土壤水分二次分配”等配套技术,进行栽植枸杞。肥料随灌水施入,施肥量为同区域、同等生龄作物大田施肥量的 1/3。该技术攻克了龟裂碱土水分不渗透、不扩散的难题,种植的枸杞生长状况良好,栽植 2 a 的枸杞产量、效益接近同区域良田水平。

1.2 土样采集

在研究区内,选择未经破坏的典型剖面 3 个,研究剖面盐分垂直分布特征。取样深度为 0 ~ 5、5 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30、30 ~ 40 cm,40 cm 以下每 20 cm 取样一次,直到 200 cm。

在滴灌开发利用小区,于 2010 年枸杞生长季末(10 月下旬)取土,取土位置为距离滴头水平距离 0、10、20、30、40、60、80、100、120、150 cm 处,深度为 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30、30 ~ 40、40 ~ 60、60 ~ 80、80 ~ 100 cm,6 个重复。

所有土样经自然风干后,剔出杂质,磨细,过 1 mm 孔径筛,充分混匀,装入容器待用。

1.3 土样化学分析

所有土样可溶性盐分的测定均采用国际上通用的调制饱和泥浆的方法进行。测定土壤饱和泥浆 pH 值及饱和泥浆提取液电导率(EC_e),并根据温度补充系数换算至标准温度 25℃ 下的电导率。饱和泥浆经离心获得提取液,测定提取液中 CO₃²⁻、HCO₃⁻、Cl⁻、SO₄²⁻、Mg²⁺、Ca²⁺、K⁺、Na⁺ 等盐基离子含量。CO₃²⁻、HCO₃⁻ 采用双指示剂 - 中和滴定法;Cl⁻ 采用硝酸银滴定法;SO₄²⁻ 采用 EDTA 间接络

合滴定法;Mg²⁺、Ca²⁺ 用 EDTA 滴定法;K⁺、Na⁺ 用火焰光度计法测定^[21]。根据得出的各离子含量,计算可溶性总盐(TSS)、钠吸附比(SAR)、可溶性钠百分率(SSP)和 Cl⁻ 与阴离子总量的比值(物质质量之比)。

1.4 数据处理

化学分析数据经 Excel 整理后,采用 SPSS 统计分析软件进行统计分析,利用 sigmaplot 画图软件进行制图。

2 结果与分析

2.1 龟裂碱土土壤剖面盐分特征

龟裂碱土土壤剖面盐分离子含量分布状况见图 1。由图可见,整个 0 ~ 200 cm 的剖面内,土壤主要盐分离子含量总体呈现“T”字型分布。表层 0 ~ 5 cm 土壤中,可能是由于雨水淋洗作用,盐分离子含量较低,其余 5 ~ 40 cm 深度土壤的主要盐分离子含量明显高于下层。从图 1a 中还可看出,上层(0 ~ 30 cm 深度)土壤中阴离子主要为 Cl⁻ 和 SO₄²⁻,二者随深度增加,含量逐渐降低,到 180 ~ 200 cm 深度处,未检测出 SO₄²⁻。HCO₃⁻ 和 CO₃²⁻ 含量相对较低,特别是在表层 0 ~ 40 cm 土壤中,HCO₃⁻ 和 CO₃²⁻ 含量显著低于 Cl⁻ 含量。随深度的增加,二者含量表现出波动式的变化。就整个 0 ~ 200 cm 的剖面来说,100 cm 深度以下土层中,HCO₃⁻ 含量明显增多,在 160 ~ 180 cm 深度处,HCO₃⁻ 含量最大。相对于阴离子,阳离子含量在剖面内的变化较小。Na⁺ 是土壤整个 0 ~ 200 cm 剖面中主要的阳离子,呈现典型的“T”型分布。其它 3 个离子,Mg²⁺、Ca²⁺ 和 K⁺ 在整个剖面的含量一直较低,且随深度变化不大。

土壤剖面其它化学性质列于表 1。从表中可以看出,在整个剖面,可溶性钠百分率(SSP)均处于较高水平,说明 Na⁺ 为该土壤中最主要的阳离子。不同深度来看,表层土壤 SSP 较高,5 ~ 40 cm 深度的土样 SSP 均大于 90%,0 ~ 100 cm 土壤的平均 SSP 高达 85.54%,随深度的增加,SSP 逐渐下降,至深度 180 ~ 200 cm,土壤 SSP 下降为 59.54%,其余深度 SSP 普遍大于 70%。Cl⁻ 与阴离子总量的 mol 比值表现出和 SSP 一致的剖面变化趋势,表层土壤比值较高,在 70% 左右,然后随深度增加,Cl⁻ 与阴离子总量的 mol 比值逐渐降低,这也是由于下层土壤中 HCO₃⁻ 相对含量高于上层的缘故(图 1)。SAR 是描述盐渍土土壤碱化状况的重要参数。从表 1 中可看出,0 ~ 40 cm 土壤 SAR 较大,均高于 15 (mmol/L)^{0.5},最大值在 10 ~ 20 cm 深度处,SAR 为 38.20 (mmol/L)^{0.5}。

随深度增加, SAR 逐渐降低, 在 80 cm 以下土壤中 SAR 值一直维持在较低水平, 180~200 cm 深度处最低, 为 2.67 (mmol/L)^{0.5}。

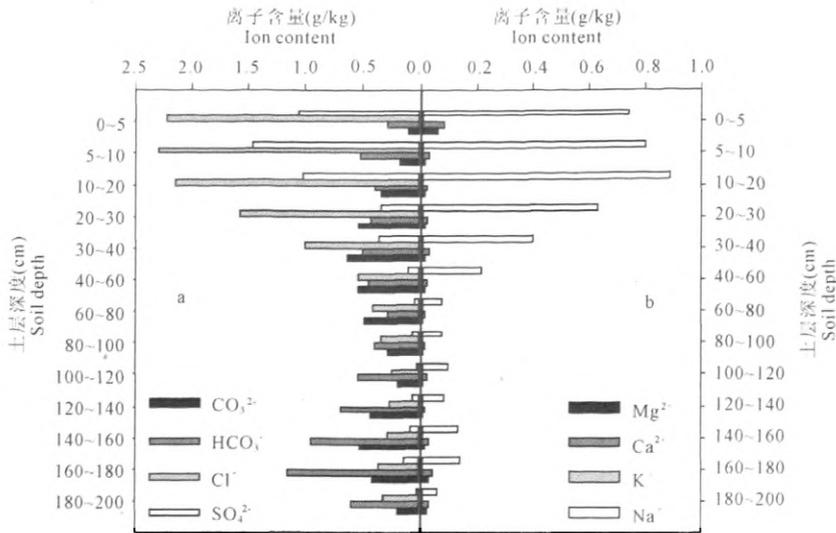


图 1 离子含量剖面分布

Fig.1 Distribution of ion contents in soil profile

从表 1 还可以看出, 龟裂碱土可溶性总盐 (TSS) 含量在 1.21~5.31 g/kg 之间, 说明其盐分含量并不高。TSS 在整个剖面的变化趋势同 EC_e 表现相一致: 表层较高, 随深度增加逐渐降低, 结合盐分

离子的剖面内变化趋势, 说明龟裂碱土土壤盐分有明显的“表聚”现象。龟裂碱土整个剖面的饱和泥浆的 pH 值一直较高, 除 0~5 cm 土壤的 pH 值为 8.5 之外, 其余均在 9 以上, 随深度增加, pH 值略有降低。

表 1 土壤剖面主要化学特征

Table 1 The main chemical characteristics in soil profile

土层深度 (cm) Soil depth	SSP (%)	Cl ⁻ 与阴离子总量 的比值 (%)	SAR [(mmol/L) ^{0.5}]	TSS (g/kg)	EC _e (dS/m)	pH
0-5	86.74	76.92	20.58	4.55	18.37	8.50
5-10	94.86	68.86	35.65	5.31	18.70	9.30
10-20	95.84	68.00	38.20	4.84	11.66	9.58
20-30	94.50	60.98	27.29	3.57	6.69	9.52
30-40	91.34	49.02	16.37	2.95	4.16	9.51
40-60	87.30	37.31	10.91	1.91	2.45	9.50
60-80	77.09	35.95	5.46	1.33	1.89	9.43
80-100	77.09	37.82	5.46	1.21	1.67	9.24
0-100 加权平均	85.54	47.30	15.36	2.52	5.31	9.38
100-120	77.47	30.86	5.46	1.15	1.50	9.18
120-140	77.85	39.47	5.46	1.58	1.48	9.14
140-160	77.09	33.33	5.46	2.04	1.31	9.15
160-180	70.09	35.21	4.46	2.31	1.32	9.06
180-200	59.54	48.39	2.67	1.25	1.46	9.01
100-200 加权平均	72.41	37.45	4.70	1.67	1.41	9.11

2.2 土壤各化学性质的描述统计和相关性

由于 CO₃²⁻ 的 mol 含量较低, 所以下文中, 用 HCO₃⁻ 含量代替总碱度 (CO₃²⁻ + HCO₃⁻) 进行相关统计分析和主成分分析。变异系数 (CV) 能够反映随机变量的离散程度, 一般认为 CV ≤ 10% 为弱变异

性; 10% < CV < 100% 为中等变异性; CV ≥ 100% 为强变异性^[22]。比较土壤离子之间的空间变异系数的大小, 可在一定程度上看出不同离子在土壤剖面内的分布特征和随水分迁移速率的差异^[3]。

由表 2 可以看出, 由于区内水文及水文地质条

件比较复杂^[19],加上滴灌开发利用的影响,致使研究区内的土壤盐分表现出较大的空间变异性。 Na^+ 和 Cl^- 在滴灌利用后表现出相对较高的空间变异性,变异系数较大,分别为95.4%和88.30%,这是由于二者与土壤胶体的吸附力较弱,具有很强的随水分迁移的能力^[23]。而 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 不易被灌溉水淋洗,受灌水影响较小,在土壤剖面分布相对均匀,空间变异性相对较小,这和前人研究结果类似^[24]。 Na^+ 的空间变异性大于 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} ,结合SAR的计算公式,可以得出,相对于 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} , Na^+ 变异性主要影响SAR的变异,因此在此类土壤上控制土壤中的 Na^+ 有利于控制土壤碱化程度。 SO_4^{2-} 和 K^+ 含量表现出强变异性,可能是因为二者在土壤中含量较少的缘故。此外,除pH值之外的其它土壤化学性质均表现出中等变异性。pH值表现为弱变异性,说明龟裂碱土在开发利用过程中,在区域尺度上pH值不会出现较大幅度的变化。

表 2 土壤主要化学性质的描述统计

Table 2 Descriptive Statistics of main chemical characteristics in soils

项目 Items	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Mean	标准差 Std.	变异系数 CV(%)
HCO_3^-	0.28	5.32	1.13	0.54	47.86
Cl^-	0.23	8.83	1.04	0.99	95.40
SO_4^{2-}	0.00	4.36	0.31	0.53	173.90
Mg^{2+}	0.00	0.13	0.02	0.02	82.80
Ca^{2+}	0.00	0.13	0.04	0.02	59.83
K^+	0.00	0.15	0.01	0.01	180.50
Na^+	0.06	3.24	0.47	0.41	88.30
SAR	2.33	138.91	22.13	19.27	87.07
TSS	1.10	18.02	3.03	2.10	69.33
SSP	24.10	98.23	79.65	13.45	16.88
EC_e	1.13	49.06	7.71	7.18	93.17
pH	7.22	10.06	9.29	0.53	5.68

对土壤盐分离子进行相关性分析,可在一定程度上揭示盐分在土体中的存在形态及离子运移携同的关系^[25-26]。土壤中各种盐分离子和其它主要化学性质之间的相关性系数列于表3。各离子之间的相关性比较发现, Na^+ 作为最主要的阳离子,与阴离子中的 Cl^- 的相关系数最大,为0.868($P < 0.01$),其次为 SO_4^{2-} ,相关系数为0.813($P < 0.01$),与 HCO_3^- 的相关系数最小,说明 Na^+ 主要与 Cl^- 携同运移,其次为 SO_4^{2-} , HCO_3^- 与 Na^+ 的携同运移关系最小,这与前人研究结果,盐分上下运动中,氯化物最为活跃,其次是硫酸盐,碳酸盐比较稳定的运移

规律一致^[11]。 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的相关系数为0.754。 Mg^{2+} 与各离子中的 Ca^{2+} 相关系数最大,为0.676($P < 0.01$),因此在离子运移研究中常将二者归为一类^[2,24]。

土壤可溶性总盐(TSS)含量与除 Mg^{2+} 和 K^+ 之外的其它5个离子均表现出极显著的正相关,其中与 Cl^- 和 Na^+ 的相关系数最大,分别为0.967($P < 0.01$)和0.910($P < 0.01$),再次说明 Cl^- 和 Na^+ 是影响土壤中盐分状况的主要离子,由于氯化物和钠盐均易被淋洗^[3],因此,通过适当的淋洗控制 Cl^- 和 Na^+ 的含量,就可控制此类土壤的盐分含量。 EC_e 与各离子之间的相关性表现与TSS一致, EC_e 和TSS的相关系数为0.922($P < 0.01$)。SAR与 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 Na^+ 均呈极显著正相关,这是由于 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 直接或间接地影响着 Na^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 含量,其中与 Na^+ 的相关系数最大,为0.799($P < 0.01$)。pH值与 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 K^+ 呈现极显著负相关,与其它离子和化学指标呈极显著正相关,且与 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的相关系数分别为-0.540($P < 0.01$)和-0.383($P < 0.01$),其绝对值大于pH值与其它离子相关系数的绝对值。SAR和pH值与 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 的负相关的关系说明 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 含量的增加,有利于减小土壤SAR,降低pH值,进而改善土壤酸碱环境,改善土壤物理性质,改良碱土^[27]。但就此区域来说,土壤中原有 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 含量较低,外源施入成本较高^[28],因此改良碱土的方法并没有得到广泛利用。

2.3 主成分分析

由于土壤盐分的空间变异大(表2),难以定量描述土壤盐分及各离子的分布特征,因此本文采取主成分分析的方法,构建具有代表性和限制性的盐分特征因子,用于评价滴灌开发利用条件下龟裂碱土的盐渍化状况,以便为其滴灌利用的可行性分析和盐渍化发展方向研究提供方法和参考。相关分析表明,土壤各化学性质因子之间存在较强的相关性,且经KMO检验(Kaiser-Meyer-Olkin Measure)和Bartlett球度检验(Bartlett's Test of Sphericity)得知,KMO值为0.635,Bartlett值为5953.367,球度检验的相伴概率为0.000,小于显著性水平0.05,表明本研究选用的数据适合做因子分析^[8]。在求算主成分因子时,采用方差最大正交旋转法进行转轴,通过此方法可使得每个因子的最高载荷的变量数最少,使得每个因子可独立表达各自的含义,但每个变量的共同性不会改变,使因子载荷量易于解释^[8]。以累计

方差贡献率大于 85% 的原则确定主成分的个数, 计算选择出来的特征值的标准正交特征向量, 得出各因子的因子载荷和因子得分系数。

表 3 土壤化学性质的相关系数

Table 3 Pearson Correlations of the chemical characteristics in soils

项目 Item	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Mg ²⁺	Ca ²⁺	K ⁺	Na ⁺	SAR	TSS	SSP	EC _e
Cl ⁻	0.630**										
SO ₄ ²⁻	0.363**	0.754**									
Mg ²⁺	0.035	-0.002	0.054								
Ca ²⁺	0.289**	0.170**	0.109*	0.676**							
K ⁺	0.083	0.104*	0.018	0.246**	0.310**						
Na ⁺	0.513**	0.868**	0.813**	-0.025	0.092	0.010					
SAR	0.437**	0.704**	0.624**	-0.288**	-0.221**	-0.065	0.799**				
TSS	0.720**	0.967**	0.834**	0.033	0.211**	0.087	0.910**	0.725**			
SSP	0.080	0.276**	0.298**	-0.701**	-0.640**	-0.370**	0.462**	0.638**	0.290**		
EC _e	0.527**	0.938**	0.784**	-0.025	0.086	0.041	0.904**	0.733**	0.922**	0.365**	
pH	0.335**	0.229**	0.147**	-0.540**	-0.383**	-0.341**	0.242**	0.338**	0.258**	0.615**	0.214**

注: ** 相关性在 0.01 水平下显著(双尾检验); * 相关性在 0.05 水平下显著(双尾检验)。

Note: ** Correlation is significant at the 0.01 level(2-tailed); * Correlation is significant at the 0.05 level(2-tailed).

表 4 给出了前 4 个主成分因子的方差贡献率和累积方差贡献率, 由表中可以看出前 4 个特征值(转轴后的特征值分别为: 5.032 + 2.936 + 1.430 + 1.063 = 10.461) 所对应的方差贡献率分别为: 41.936%, 24.470%, 11.920% 和 8.856%, 累积方差贡献率为 87.183%, 这说明前 4 个主成分已包含了原来 12 个因素信息中的绝大部分信息, 信息损失量仅为 12.817%。

主成分因子载荷是主成分因子与原始变量因子之间的相关系数^[8]。由表 5 可以看出, 第一主成分的特点表现为因子变量在土壤盐分含量状况(TSS 和 EC_e) 和主要离子上有较高的正载荷, 正载荷最大的 4 个原始变量因子依次为 Na⁺、EC_e、TSS 和 Cl⁻, 载荷分别为 0.952、0.942、0.929 和 0.91, 说明第一主成分代表了土壤盐化状况。从 Na⁺ 和 Cl⁻ 含量对第一主成分的贡献就可以理解第一主成分所代表的实际意思, 再次验证了 Cl⁻ 和 Na⁺ 分别为该区域最主要的阴阳离子。此外, SO₄²⁻ 含量和 SAR 值也在第一主成分的因子变量中具有较高的正载荷。因此, 第一主成分替代了 12 个原始因子中的 X₂(Cl⁻)、X₃(SO₄²⁻)、X₇(Na⁺)、X₈(SAR)、X₉(TSS) 和 X₁₁(EC_e) 6 个因子的作用。

碱化土壤中过多 Na⁺ 的最主要危害就是对土壤物理性状的恶化, 使土壤粘粒和团聚体分散, 从而使土壤对水和空气的渗透性降低^[2]。而土壤中 Mg²⁺ 和 Ca²⁺ 可以置换胶体上吸附的 Na⁺, 减小粘粒的分散程度, 凝聚胶体, 从而优化土壤结构^[2]。在第二主

成分的因子变量中, Mg²⁺ 和 Ca²⁺ 具有较其他变量更高的正载荷, 分别为 0.902 和 0.869, 结合二者在土壤中的作用, 说明第二主成分代表了此类土壤结构状况。同时在第二主成分变量因子中, pH 和 SSP 具有较高的负载荷。原因是由于 pH 值的降低不仅代表土壤碱性的降低, 而且有利于 Mg²⁺ 和 Ca²⁺ 的溶解, 增加二者含量, 同时 SSP 减小, 亦说明 Mg²⁺ 和 Ca²⁺ 的所占阴离子比例的增大。因此, 第二主成分替代了 12 个原始因子中的 X₄(Mg²⁺)、X₅(Ca²⁺) 和 X₁₀(SSP) 3 个因子的作用。

表 4 转轴后的因子载荷平方和

Table 4 Rotation Sums of Squared Loadings

因子 Component	特征值 Eigenvalues	方差贡献率 Rate of Variance	累计贡献率(%) Cumulative rate
1	5.032	41.936	41.936
2	2.936	24.470	66.406
3	1.430	11.920	78.327
4	1.063	8.856	87.183

注: 提取公因子方法: 主成分分析法。转轴方法: 方差最大正交旋转法。下同。

Note: Extraction method: principal component analysis. Rotation method: varimax with kaiser normalization. The same as below.

第三主成分的方差贡献率为 11.131%, 其主要特征是在 pH 和 HCO₃⁻ 上有较高的正载荷, 分别为 0.609 和 0.81。由于 pH 值是土壤碱化特征的重要指标之一, 而 HCO₃⁻ 不仅是盐分离子组成, 还代表了土壤总碱度, 所以说第三主成分代表此类土壤的碱化特征。第三主成分替代了 12 个原始因子中的

$X_1(\text{HCO}_3^-)$ 和 $X_{12}(\text{pH})$ 2 个因子的作用。

第四主成分因子变量在 K^+ 含量有较高的正载荷, 为 0.958。由于 $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/(\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+})$ 不仅表示土壤中离子组成, 更是土壤结构状况的指标, 因此可以说第四主成分是对第一主成分(土壤盐化状

况) 和第二主成分(土壤结构) 的补充因子, 用以表示除 Na^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 等碱化土壤重要离子之外的其它离子含量状况。第四主成分仅替代了 12 个原始因子中的 $X_6(\text{K}^+)$ 1 个因子的作用。

表 5 主成分因子的载荷矩阵和得分系数矩阵

Table 5 Rotated Component Matrix and Component Score Coefficient Matrix

原始因子 Initial Component		转轴后的因子载荷矩阵 Rotated Component Matrix				因子得分系数矩阵 Component Score Coefficient Matrix			
编号 No.	项目 Items	PC1	PC2	PC3	PC4	PC1	PC2	PC3	PC4
X_1	HCO_3^-	0.463	0.121	0.810	0.086	-0.092	0.076	0.719	0.064
X_2	Cl^-	0.91	0.02	0.284	0.089	0.159	0.025	0.056	0.064
X_3	SO_4^{2-}	0.896	0.04	-0.022	-0.073	0.243	0.064	-0.259	-0.126
X_4	Mg^{2+}	0.042	0.902	-0.122	0.004	0.071	0.378	-0.099	-0.244
X_5	Ca^{2+}	0.110	0.869	0.212	0.118	-0.005	0.349	0.229	-0.104
X_6	K^+	0.040	0.224	-0.009	0.958	-0.018	-0.163	0.015	0.985
X_7	Na^+	0.952	-0.075	0.126	-0.026	0.213	0.010	-0.125	-0.043
X_8	SAR	0.796	-0.398	0.105	0.006	0.167	-0.141	-0.118	0.086
X_9	TSS	0.929	0.052	0.345	0.048	0.151	0.053	0.114	0.011
X_{10}	SSP	0.373	-0.834	0.037	-0.236	0.070	-0.277	-0.101	-0.046
X_{11}	EC_e	0.942	-0.043	0.146	0.022	0.205	0.012	-0.099	0.002
X_{12}	pH	0.115	-0.605	0.609	-0.278	-0.139	-0.152	0.564	-0.129

主成分分析模型将变量表示成公共因子的线性组合, 自然也可以将公共因子表示成原始变量的线性组合^[8]。本研究选用回归法计算得出各原始因子的得分系数, 见表 4。由此可将提取出的 4 个主成分表示为原始变量的线性组合:

$$\text{PC1} = -0.092X_1 + 0.159X_2 + 0.243X_3 + 0.071X_4 - 0.005X_5 - 0.018X_6 + 0.213X_7 + 0.167X_8 + 0.151X_9 + 0.070X_{10} + 0.205X_{11} - 0.139X_{12}$$

$$\text{PC2} = 0.076X_1 + 0.025X_2 + 0.064X_3 + 0.378X_4 - 0.349X_5 - 0.163X_6 + 0.010X_7 - 0.141X_8 + 0.053X_9 - 0.277X_{10} + 0.012X_{11} - 0.152X_{12}$$

$$\text{PC3} = 0.719X_1 + 0.056X_2 - 0.259X_3 - 0.099X_4 + 0.229X_5 + 0.015X_6 - 0.125X_7 - 0.118X_8 + 0.114X_9 - 0.101X_{10} - 0.099X_{11} + 0.564X_{12}$$

$$\text{PC4} = 0.064X_1 + 0.064X_2 - 0.126X_3 - 0.244X_4 - 0.104X_5 + 0.985X_6 - 0.043X_7 + 0.086X_8 + 0.011X_9 - 0.046X_{10} + 0.002X_{11} - 0.129X_{12}$$

其中 PC1、PC2、PC3、PC4 分别为第一主成分、第二主成分、第三主成分、第四主成分; X_1 、 X_2 、 X_3 …… X_{12} 分别为 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} ……pH 等 12 个原始变量因子。

图 2 给出了原始变量因子在 4 个主成分变量中

的二维因子载荷情况, 图中的每个点都有原来 7 维空间的样本点降维映射而来。从图中可以清楚地看出各原始变量因子之间存在明显的“聚类”分布现象: TSS、 EC_e 、 Na^+ 和 Cl^- 聚成一簇, 位于第一主成分的正端, Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 聚成一簇, 位于第二主成分的正端, pH 和 HCO_3^- 聚成一簇, 位于第三主成分的正端, 而 K^+ 单独位于第四主成分的正端。各原始变量因子之间的离散程度进一步说明, 该研究区域土壤盐碱化的 4 个主要因素: 土壤盐化状况、土壤结构状况、土壤的碱化特征和除 Na^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 等碱化土壤重要离子之外的其它离子含量状况。

3 结 论

宁夏银北地区龟裂碱土具有干旱区盐碱土壤盐分表聚特征, 剖面离子组成中 Cl^- 和 Na^+ 分别是最主要的阴阳离子, HCO_3^- 含量在 100 cm 深度以下的土层中逐渐增加。影响此类土壤滴灌开发利用的主要因素依次为土壤盐化状况、土壤结构状况、土壤碱化特征及除 Na^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 等离子之外的其它主要离子含量状况, 前 4 个主成分的累积方差贡献率为 87.18%。由此可见, 在利用过程中首先需要降低土壤盐度, 进而通过改变离子组成减小土壤碱度, 改善土壤结构。

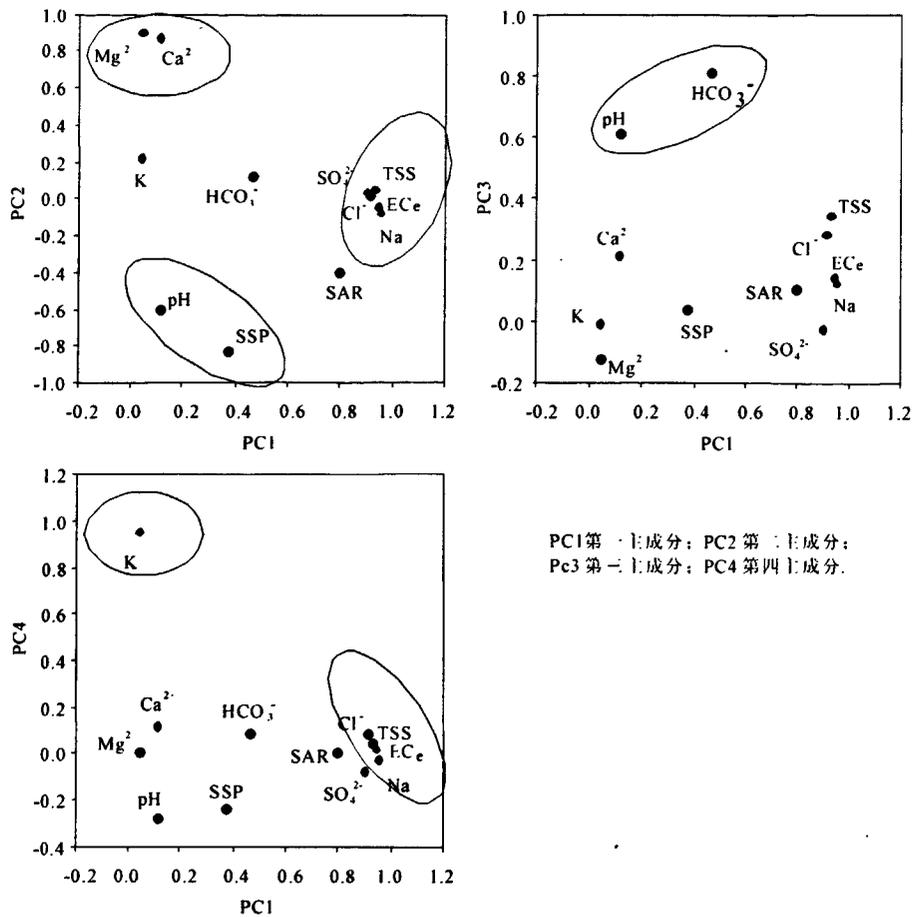


图 2 土壤盐分变量的二维因子载荷

Fig.2 Loading plots of soil salinity variables in the space defined by two components

参考文献:

[1] Qadir M, Schubert S, Ghafoor A, et al. Amelioration strategies for saline soils: a review[J]. Land Degrad. Develop, 2000, 11: 501-521.

[2] 李法虎. 土壤物理化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.

[3] 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培, 等. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993.

[4] 王全九, 王文焰, 汪志荣, 等. 盐碱地膜下滴灌技术参数的确定[J]. 农业工程学报, 2001, 17(3): 47-50.

[5] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 837-845.

[6] 谭军利, 康跃虎, 焦艳平, 等. 不同种植年限覆膜滴灌盐碱地土壤盐分离子分布特征[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 59-63.

[7] 姚荣江, 杨劲松, 姜龙, 等. 基于聚类分析的土壤盐渍剖面特征及其空间分布研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(1): 56-65.

[8] 郝黎仁, 樊元, 郝哲欧, 等. SPSS 实用统计与分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.

[9] 赵益新, 赵珂, 沈航航. 多因素主成分分析及其在生态环境研究中的应用[J]. 西南民族大学学报, 2008, 34(2): 203-206.

[10] 崔璇, 武亮. 主成分分析(PCA)在地理学中的应用进展[J]. 中山大学研究生学刊, 2009, 30(4): 41-48.

[11] 刘延峰, 靳孟贵, 金英春. 焉善盆地土壤盐渍化状况的主成分分析[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(1): 165-171.

[12] 任加国, 郑西来, 许模, 等. 新疆叶尔羌河流域土壤盐渍化特

征研究[J]. 土壤, 2005, 37(6): 635-639.

[13] 姚荣江, 杨劲松. 黄河三角洲地区土壤盐渍化特征及其剖面类型分析[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(11): 106-112.

[14] 王海林. 共和盆地弃耕地盐碱化主成分分析[J]. 草原与草坪, 2008, (6): 61-65.

[15] 魏占雄. 共和盆地弃耕地盐碱化状况的主成分分析[J]. 草原与畜牧, 2009, (3): 13-17.

[16] 王雪梅, 塔西甫拉提·特依拜, 柴仲平, 等. 新疆典型盐渍化区离子特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(12): 183-187.

[17] 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 海米提·依米提, 艾尼瓦尔·买买提, 等. 天山西部伊犁河流域土壤盐分特征[J]. 环境科学研究, 2010, 23(6): 774-781.

[18] 王吉智. 宁夏土壤[M]. 宁夏: 宁夏人民出版社, 1990.

[19] 殷允相. 龟裂碱土的形成、性质及改良途径[J]. 土壤通报, 1985, 16(5): 206-208.

[20] 李宏广, 何文寿, 段晓红, 等. 宁夏前进农场碱化土壤改良及水稻合理施肥技术研究[J]. 西北农业学报, 2009, 18(5): 217-222.

[21] 鲍士旦. 土壤农化分析(3版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[22] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.

[23] 熊顺贵. 基础土壤学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2001.

[24] 焦艳平, 康跃虎, 万书勤, 等. 干旱区盐碱地滴灌土壤基质势对土壤盐分分布的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 53-58.

[25] 艾合买提·那由甫, 李卫红, 徐海量. 塔里木河中游土壤分布规

- 律及其特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(1):149-153. 业出版社, 1984.
- [26] 郭全恩, 王益权, 郭天文, 等. 半干旱盐渍化地区果园土壤盐分离子相关性研究[J]. 土壤, 2009, 41(4):664-669. [28] 孙毅, 高玉山, 闫孝贡, 等. 石膏改良苏打盐碱土研究[J]. 土壤通报, 2001, 32:97-101.
- [27] 俞仁培, 杨道平, 石万普, 等. 土壤碱化及其防治[M]. 北京: 农

Studies on salinity characteristics of takyric solonetz in Ningxia Yinbei region based on principal component analysis

ZHANG Ti-bin^{1,2}, KANG Yue-hu¹, HU Wei¹, DOU Chao-yin³

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Liaoning Institute of Water Conservancy and Hydropower, Shenyang, Liaoning 110003, China)

Abstract: In order to investigate the basic salinity conditions and the dominant, restrictive factors of salinity characteristics of takyric solonetz under drip irrigation in Ningxia Yinbei Region, classical statistical analysis and principle component analysis (PCA) was applied to explore the salinity characteristics of takyric solonetz utilized by drip irrigation. The results showed that the salt ions content distributed as a "T" letter in soil profile of takyric solonetz. SAR in 0 ~ 40 cm soil was above 15 (mmol/L)^{0.5}, and pH values about 9.5. Na⁺ and Cl⁻ were the dominant cation and anion respectively in the soil, and HCO₃⁻ content increased gradually in the soils below 100 cm. Total soluble salt (TSS) in the soil had the strangest correlation with the contents of Cl⁻ and Na⁺, the correlation coefficients were 0.967 and 0.910 ($P < 0.01$), meanwhile the positive correlation between TSS and the electrical conductivity of saturation paste extracts (EC_e) was significant at 0.01 level. The results of PCA showed that four principle components, which could explain 88.28% of the total variance, represented the saline condition, structure condition, alkaline characteristics and the contents of ions other than key ions such as Na⁺, Mg²⁺ and Ca²⁺ in solonetz, respectively, affected the utilization of takyric solonetz. For the reasons above, like other salt-affected soils in arid regions, takyric solonetz in Ningxia Yinbei region had the characteristics of the salt accumulation at surface soil layers. To decrease the salinity should be the first step in the utilization, and next, reduce the alkalinity, ameliorate the soil structure through changing the salt components.

Keywords: takyric solonetz; salinity characteristics; principal component analysis

(上接第 38 页)

Features of salinity accumulation in an original saline wasteland covered with water-permeable plastic film

GUO Wen-cong^{1,2}, FAN Gui-sheng^{1,3}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China; 2. Shanxi Institute of Water Conservancy and Hydropower, Taiyuan, Shanxi 030002, China; 3. College of Water Resources, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract: The water-permeable plastic film is a new agricultural technique, its moisture conservation role can control effectively the soil surface moisture evaporation to restrain top enrichment of soil salt, and its unidirectional permeability can control partly the soil moisture migration to dominate soil salt accumulation. The following observation experiments of soil salinity are devised in the original salinization wasteland under different covering measures, such as covering with water-permeable plastic film, covering with common film and no covering. The results indicate that the water-permeable plastic film can be used to restrain more obviously top enrichment of soil salt, and there is a negative relationship between salinity variation of soil profile and soil moisture of permeative film. So, the water-permeability plastic film can be used for controlling soil salinity accumulation, at the same, the moisture superposition of permeative film can decrease step by step the total saltiness of soil profile, then that can realize the saline - alkali soil desalinating step by step.

Keywords: water-permeable plastic film; original saline wasteland; features of salinity accumulation