DOI：10.11766/trxb201512100605

河套平原弃耕地土壤盐碱化特征*

景宇鹏[1]　段　玉[1†]　妥德宝[1]　赵沛义[1]　张　君[1]　逯栓柱[2]

（1 内蒙古农牧业科学院资源环境与检测技术研究所，呼和浩特　010031）

（2 巴彦淖尔市农牧业科学研究院，内蒙古临河　015000）

摘　要　运用经典统计和主成分分析方法，对河套平原弃耕地盐渍化土壤全盐量、pH、阴阳离子组成、碱化度（ESP）的分布特征进行了分析。结果表明：研究区土壤为中度至重度盐渍化，土壤全盐、pH、碱化度（ESP）在剖面中的变化趋势一致，呈表聚和底聚两个过程。全盐量介于2.80～6.69 g kg^{-1}之间，pH介于9.20～9.69之间，碱化度介于10.97%～33.33%之间。0～60 cm土层全盐量随土层深度增加而降低，60～120 cm 土层全盐量随土层深度增加而增加。剖面中阳离子以Na^++K^+为主；阴离子以SO_4^{2-}为主。除pH外，土壤各盐碱指标呈强烈空间变异特征；不同土层SO_4^{2-}与Ca^{2+}、Mg^{2+}、全盐量差异达极显著水平，Cl^-与K^++Na^+相关性随土层深度增加而减弱，pH、碱化度与CO_3^{2-}达极显著水平。土壤全盐量、SO_4^{2-}可作为研究区土壤盐化状况特征因子；CO_3^{2-}、HCO_3^-、pH可作为研究区土壤碱化状况特征因子。由此可见，在改良利用过程中要以降低土壤盐度和碱度来调控离子组成，进而改善土壤结构。

关键词　主成分分析；弃耕地；盐渍化特征；河套平原

中图分类号　S155.293　　**文献标识码**　A

土壤盐渍化是一个世界性问题，是引起土地退化、荒漠化的主要诱导因素之一，已成为制约干旱半干旱地区生态环境与农业高效利用的一个重要因素[1]。盐渍土的发生受区域性因素的影响较大，其盐分组成及离子比例具有明显的地域特点，积盐、脱盐过程以及盐分组成随生物、气候、地带性土壤的发生过程的不同存在较大差异[2-3]。近年来，土壤盐渍化问题和次生盐渍化问题的日益加重，盐碱地与盐渍化耕地面积不断增大，区域生态环境急剧恶化，严重影响了农作物的生长发育。河套平原由于特定的水文地质条件和长期不合理的大水漫灌制度，土地盐碱化和次生盐渍化现象更为严重，耕地盐渍化面积从原来的三分之一增加至二分之一，出现大面积耕地不得不弃耕从而成为盐碱荒地，且呈逐年增加的趋势。实践证明，土壤的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，严重限制了当地农业经济的发展[4]。

目前，围绕盐碱地改良与利用的研究较多，尤其是如何在盐碱地上实现农业的高效利用已成为研究热点。而弄清土壤盐碱化特征是实现盐碱地农业高效利用的前提。国内外学者主要从盐渍土的形成原因、分布特征、对植被的影响、改良措施[5-8]等开展了大量的研究工作，反映土壤与环境之间的相互关系；在分析方法上常采用常规分析方法[9-11]，多数侧重于单个离子含量的直接测定和定性描述。但这些研究方法均无法直观地反映出某一地区盐碱

* 国家自然科学基金项目（41501578）、公益性行业（农业）科研专项（201503120）和内蒙古科技厅引资项目（20121606）资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China（No. 41501578），the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest（No. 201503120）and the Science and Technology Department of Investment Projects Inner Mongolia（No. 20121606）

† 通讯作者 Corresponding author，E-mail：yduan@ipni.ac.cn

作者简介：景宇鹏（1983—），男，博士，助理研究员，主要从事盐渍化土壤资源利用与土壤培肥研究，E-mail：jyp236@163.com

收稿日期：2015-12-10；收到修改稿日期：2016-01-26；优先数字出版日期（www.cnki.net）：2016-07-05

化特征以及因子间的定量分析及相互关系，而主成分分析方法能从影响土壤盐碱化的多个因子中构建出一个或少数几个综合指标，综合反映土壤盐碱化的特点。为此，本文采用经典统计和主成分分析的方法，分析弃耕地盐碱荒地的盐渍化状况，构建河套平原弃耕地盐渍化过程中具有代表性和限制性的关键因子，为合理开发和改良利用河套平原盐渍化土地资源以及区域生态环境建设提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于内蒙古鄂尔多斯市达拉特旗境内，地处阴山山地与鄂尔多斯高原之间的黄河沿河平原，是河套平原的主要组成部分，属温带大陆性半干旱季风气候区，处于亚洲中部温带草原向半干旱、干旱地带荒漠草原过渡。该区域春季干旱少雨多风，夏季炎热，秋季凉爽，冬季寒冷；年日照时数3 159 h，无霜期平均159.8 d；年平均气温6.1～7.1 ℃，多年平均降水240～360 mm，降水多集中在6—9月，约占全年降水量的70%；蒸发量达1 450～3 250 mm，蒸降比在6～9 之间；常年以西北风为主。区内地下水位普遍较高，多介于1.2～2.1 m之间，且矿化度高[12]。由于干旱、大风与洪涝作用而导致沿河平原土壤盐渍化特征明显，主要分布有草甸盐土、草甸碱土、普通盐土和沼泽盐土，盐渍化土壤总面积为718.3 hm^2，占土地总面积的9.23%，其中沿河平原盐渍化面积686.4 hm^2，占平原面积的37.16%。

1.2　样品采集与分析

在研究区沿河一带盐渍化弃耕地集中分布的5个典型地区（中西和、乌兰、四村、德胜泰、乌兰淖尔）进行取样。在每个典型区域分别选取5个取样点，在每个取样点随机挖掘3个土壤剖面，按0～10、10～20、20～40、40～60、60～80、80～100、100～120 cm土层进行土壤样品的采集，将相同层次的土样充分混合。将采集的样品装入自封袋带回实验室自然风干后过筛备用，共采集175个土壤样品。

土壤pH采用pH计（1∶5的土水比浸提液）电位法测定；土壤中各盐分离子测定，Ca^{2+}、Mg^{2+}、SO_4^{2-} 采用EDTA滴定法，Na^++K^+离子采用差量法，CO_3^{2-}和HCO_3^-离子采用双指示剂中和滴定法，Cl^-离子采用硝酸银滴定法；阳离子交换量采用乙酸钠浸提火焰光度计法；交换性钠采用乙酸铵浸提火焰光度计法[13]。

1.3　数据处理

$$土壤碱化度（ESP）= \frac{交换性钠}{阳离子交换量} \times 100$$

土壤全盐量（g kg^{-1}）= 8种盐分离子质量分数（g kg^{-1}）之和。

数据采用SPSS统计分析软件进行相关性分析和主成分分析。

2　结　果

2.1　土壤全盐量剖面分布特征

土壤全盐量是表征土壤含盐量的大小及盐渍化程度高低的重要指标[14]。从图1中可以看出，研究区土壤含盐量较高，0～120 cm土层土壤全盐量在2.80～6.69 g kg^{-1}之间。从土壤全盐量在整个剖面中的分布状况来看，研究区0～120 cm土层土壤呈重度盐渍化，随土层深度增加表现为先降低后升高的变化趋势，总体呈表层和底层盐分含量高、中间土层盐分含量低。0～10 cm和100～120 cm土层盐分含量明显高于其他土层，平均含量分别为6.69 g kg^{-1}和6.10 g kg^{-1}，是盐分的积累层，60～80 cm土层全盐量最低，为2.80 g kg^{-1}。即0～60 cm土层全盐量随土层深度增加而降低，60～120 cm 土层全盐量随土层深度增加而增加。由此可见，河套平原弃耕地同时存在着两个过程即盐分表聚和底聚过程。

变异系数是反映变量离散程度的重要指标，在一定程度上揭示了变量的空间分布特性。整个剖面土壤全盐量的变异系数均介于24%～59%之间，属中等强度的变异性[15]。说明河套平原弃耕地盐分含量的水平分布不均匀，呈较强的空间异质性。从土壤剖面垂直分布上看，变异系数随土层深度增加呈先增大后降低再升高的“S”形变化趋势，在中间20～40 cm土层变异系数最大，达58.75%，这主要是由于表层土壤受外界农业经营活动影响较大，如耕作制度、土地利用方式；而随土层深度继续增加，60～80 cm土层盐分变异系数最小，此时的土壤盐分受外界干扰强度的影响较小，盐分分布均匀；此后随土层深度增加土壤盐分的空间变异性又逐渐增大，这可能是受该区域微地形不同和地下水

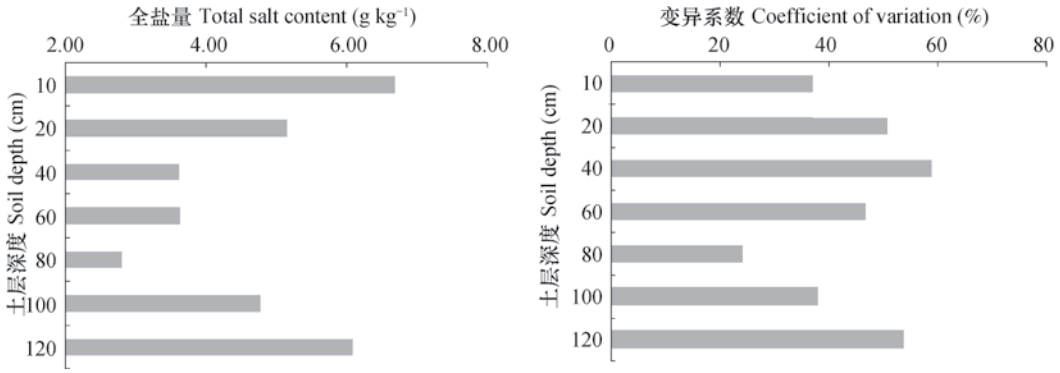

图1 土壤含盐量及其在剖面中的分布特征

Fig. 1 Soil salt content and its vertical variation in soil profile

双重作用的影响，使得剖面底部土层盐分在同一水平方向上差异较大。

2.2 土壤盐分离子剖面分布特征

2.2.1 阳离子分布特征 土壤剖面阳离子分布情况来看（图2），各土层阳离子均以Na^++K^+为主，占阳离子总量的70.46%～81.35%；其次是Ca^{2+}，占阳离子总量的9.06%～21.01%；再次是Mg^{2+}，占阳离子总量的7.79%～11.02%。从阳离子在土壤剖面中的分布来看，Na^++K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}含量在剖面中的分布状况与土壤全盐量的分布状况基本一致，均为表层和底层高、中层低，其中0～10 cm土层最高、60～80 cm土层最低。

从土壤剖面阳离子含量的变异系数来看，Na^++K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}在整个剖面均表现为中、强度变异，变异系数在27.49%～127.72% 之间。其中，Na^++K^+和Ca^{2+}的变异系数呈表层和底层高，中层低的变化趋势，最低值出现在60～80 cm土层；Mg^{2+}的变异系数呈上层高，底层低的变化趋势，最大值出现在10～20 cm土层。

2.2.2 阴离子分布特征 土壤剖面中阴离子

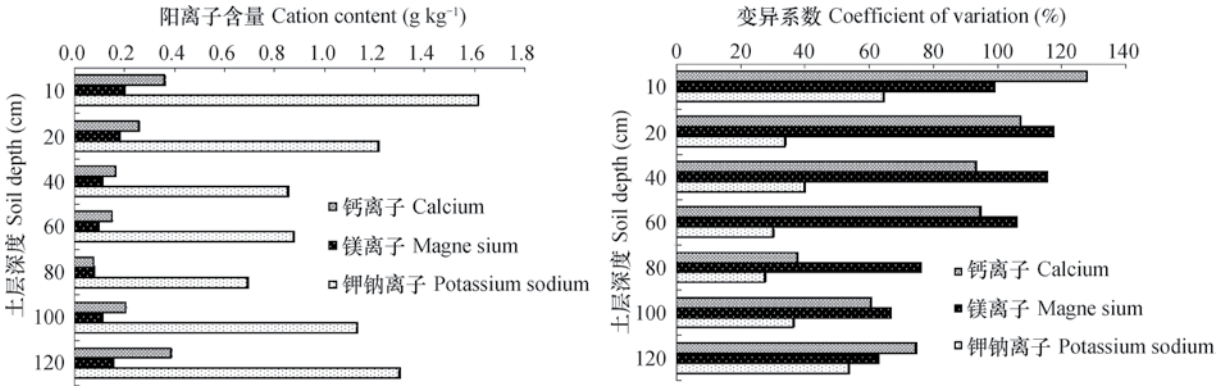

图2 土壤主要阳离子含量及其在剖面中的分布特征

Fig. 2 Contents of major cations and their vertical variation in soil profile

分布情况来看（图3），各土层阴离子以SO_4^{2-}为主，占阴离子总量的69.58%～77.46%，是研究区主要的阴离子，其在土壤剖面中的分布状态与全盐量、Na^++K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}的分布状况基本一致，呈表层和底层高、中层低，其中0～10 cm，100～120 cm土层最高、60～80 cm土层最低。其次是HCO_3^-在阴离子中所占比例较大，占阴离子总量的10.54%～22.95%，其在土壤剖面中的分布状况表现为底层和表层高，中层低的变化趋势，其中100～120 cm土层最高，20～40 cm土层最低；Cl^-占阴离子总量的3.39%～12.18%，在土壤剖面中的分布状况呈现“T”形分布，表聚强烈，即随土层深度增加Cl^-含量降低；CO_3^{2-}含量较低，只占阴离子总量的0.97%～4.32%，在土壤剖面中的分布状况与SO_4^{2-}的分布状况基本相似，0～10 cm土层最大，最小值出现在60～80 cm。

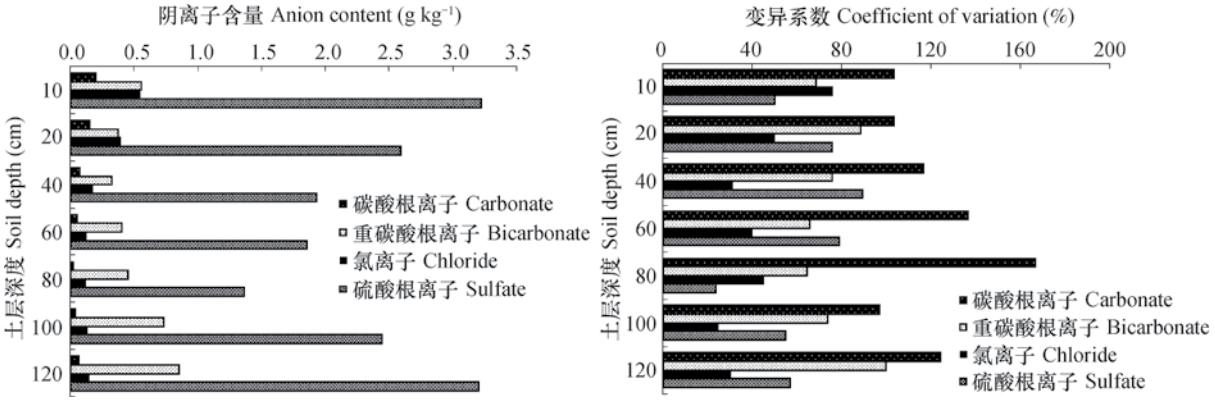

图3　土壤主要阴离子及其在剖面中的分布特征

Fig. 3　Contents of major anions and their vertical variation in soil profile

从土壤剖面中阴离子含量的变异系数来看，CO_3^{2-}、HCO_3^-、Cl^-、SO_4^{2-}在整个剖面均表现为中、强度变异，Cl^-和SO_4^{2-}在土壤剖面中的变化趋势一致，而HCO_3^-和CO_3^{2-}无明显的变化规律，变异系数在23.78%～166.45%之间。其中CO_3^{2-}的变异强度最大，变异系数在96.67%～166.45%之间，变异性最强出现在60～80 cm土层；HCO_3^-的变异强度次之，介于64.37%～99.40%之间，最大值出现在60～80 cm，最小值出现在80～100 cm土层。Cl^-的变异强度较小，介于 24.63%～75.91%之间，最大值出现在0～10 cm土层，最小值出现在60～80 cm土层。

2.3　土壤盐碱化剖面分布特征

土壤pH是评价土壤盐碱化程度的一个重要指标，对土壤氧化还原、沉淀溶解、吸附、解吸和配合反应起到支配作用[16]。土壤碱化度是判断土壤是否发生碱化的指标和依据。因此，国内外普遍认为土壤pH和碱化度是判断土壤是否发生碱化以及土壤碱化程度诊断的重要指标[9, 17]。

从土壤剖面pH分布情况来看（图4），研究区各层土壤pH变化规律表现为表层和底层大，中层最小，与CO_3^{2-}含量的分布状况一致，说明pH的变化趋势与CO_3^{2-}含量的变化趋势具有较大的相关性。各土层pH介于9.20～9.69之间，均高于8.5，说明土壤呈碱化状态；其中10～20 cm土层pH最大为9.68，60～80 cm土层pH最小为9.20。研究区土壤pH剖面的变异系数来看，其变异性均较小，介于8.30%～10.44%之间，说明土壤pH的变异性较小，空间分布较均匀。从变异系数的剖面垂直分布来看，表层土壤0～20 cm最高，60～100 cm土层最低，这可能是由于表层土壤是人类从事农业活动的主要发生层，受外界干扰较大，如施肥、耕作、灌溉等均会对pH产生显著的影响；60～100 cm土层受外界干扰和地下水影响较小，土壤pH的空间变异性较小；而100 cm以下自然因素成为影响土壤pH变化的主要因素，其中地下水矿化度是关键因素，使得土壤pH空间变异性增大。

从土壤剖面碱化度（ESP）分布情况来看（图5），研究区各层土壤碱化度与土壤Na^++K^+、pH、

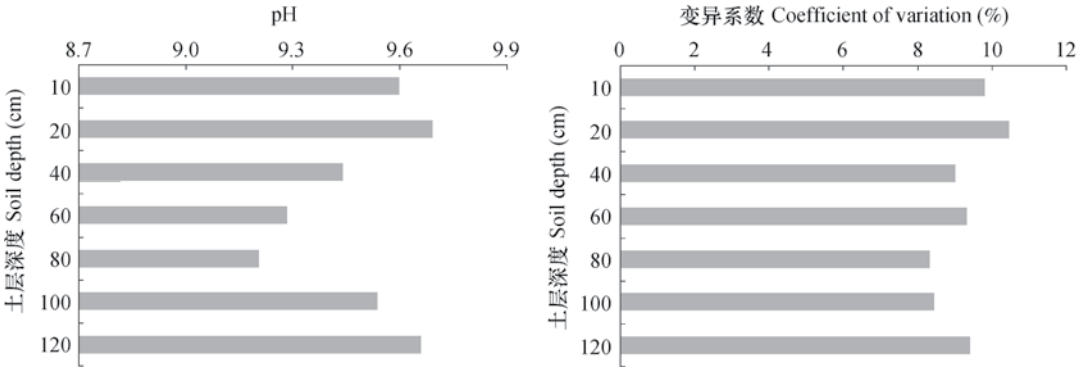

图4　土壤 pH 及其在剖面中的分布特征

Fig. 4　Soil pH and its vertical variation in soil profile

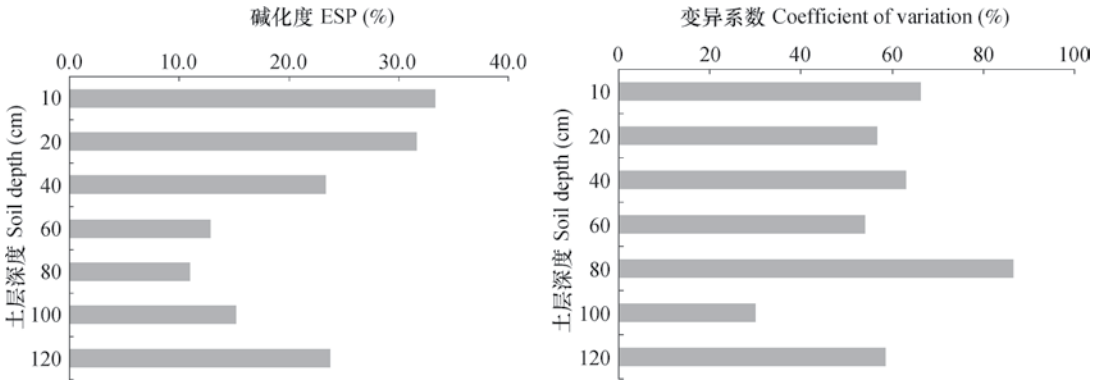

图5 土壤碱化度（ESP）及其在剖面中的分布特征

Fig. 5 Soil ESP and its vertical variation in soil profile

HCO_3^-、全盐量的变化规律基本相似，均表现为表层和底层较大，中层最小。各层土壤碱化度介于10.97%～33.33%之间，说明该区域土壤属轻度至重度碱化土壤；0～20 cm土层碱化程度最大为33.33%，呈重度碱化；60～80 cm土层碱化程度最小为10.97%，呈轻度碱化。研究区土壤碱化度剖面的空间变异性来看，其变异性无明显的变化规律，但空间变异性均属于中等变异程度，变异系数介于30.08%～86.41%之间，说明土壤碱化度的变异性较大，空间分布不均匀。

2.4 土壤盐分离子间的相关性

对土壤盐碱指标进行相关性分析，能在一定程度上揭示各盐碱指标在土壤剖面中的存在形态及运移规律，反应出其变化趋势[18-19]。相关性分析结果表明，0～10 cm土层全盐量与SO_4^{2-}呈极显著相关，相关系数为0.781；土壤pH、碱化度与HCO_3^-、CO_3^{2-}呈极显著相关；K^++Na^+与HCO_3^-、CO_3^{2-}、Cl^-呈极显著相关，SO_4^{2-}与Ca^{2+}、Mg^{2+}呈极显著相关。10～20 cm土层全盐量与SO_4^{2-}、Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^++Na^+呈极显著相关；土壤pH与SO_4^{2-}呈极显著相关，与Ca^{2+}、Mg^{2+}呈显著相关；土壤碱化度与CO_3^{2-}呈极显著相关，相关系数为0.819；K^++Na^+与CO_3^{2-}、Cl^-呈极显著相关，SO_4^{2-}与Ca^{2+}、Mg^{2+}、全盐量呈极显著相关。20～40 cm土层全盐量、pH与SO_4^{2-}、Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^++Na^+呈显著或极显著相关；而土壤碱化度与CO_3^{2-}、Cl^-呈极显著相关，相关系数为0.916、0.963；K^++Na^+与HCO_3^-、SO_4^{2-}呈极显著相关，SO_4^{2-}与Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^++Na^+呈极显著相关。40～60 cm土层全盐量同样与SO_4^{2-}、Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^++Na^+呈极显著相关；土壤pH与CO_3^{2-}、Cl^-呈显著相关；土壤碱化度与CO_3^{2-}呈显著相关；K^++Na^+与SO_4^{2-}呈极显著相关，SO_4^{2-}与Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^++Na^+呈极显著相关。60～80 cm土层全盐量与HCO_3^-、Cl^-、SO_4^{2-}、Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^++Na^+均呈显著或极显著相关；土壤pH与HCO_3^-、Cl^-呈极显著相关，相关系数为0.896、0.863；土壤碱化度与CO_3^{2-}、K^++Na^+呈极显著相关，相关系数为0.963、0.964，与Cl^-呈显著相关；K^++Na^+与HCO_3^-、CO_3^{2-}呈极显著相关，SO_4^{2-}与Ca^{2+}、Mg^{2+}、全盐呈极显著相关。80～100 cm、100～120 cm土层全盐量同样与SO_4^{2-}、Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^++Na^+呈极显著相关，K^++Na^+与HCO_3^-、CO_3^{2-}呈极显著相关，SO_4^{2-}与Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^++Na^+、全盐呈显著相关；80～100 cm土层pH与HCO_3^-、Cl^-呈极显著相关，相关系数分别为0.806、0.846，土壤碱化度与CO_3^{2-}、HCO_3^-、Cl^-呈极显著相关，相关系数分别为0.843、0.868、0.937。对比不同土壤深度各盐分离子之间相关性可知，随着土壤深度的增加，各离子间相关系数变化明显，K^++Na^+作为主要阳离子在土壤表层与Cl^-相关性较大，0～10 cm土层呈极显著相关，相关系数为0.819，且随土层深度的加深相关性减小，其次是SO_4^{2-}、CO_3^{2-}相关性较强，除表层0～10 cm、10～20 cm土壤与SO_4^{2-}相关性差异不显著外，其他土层呈显著或极显著相关。不同土层土壤碱化度与CO_3^{2-}呈极显著相关，SO_4^{2-}与Ca^{2+}、Mg^{2+}呈极显著相关。

从土壤整个剖面来看（表1），K^++Na^+与Cl^-相关性较大，其次是SO_4^{2-}、CO_3^{2-}、HCO_3^-，这与前人研究结果相一致[20]。在盐分上下运移过程中，氯化物最为活跃，其次是硫酸盐，碳酸盐。而土壤全盐量与除HCO_3^-之外的其他6个离子均表现出极

表1　整个剖面盐分离子间的相关性

Table 1　Correlation analysis of salt ions in soil profile

	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^++Na^+	全盐量 Total salt content	pH	碱化度 ESP
CO_3^{2-}	1.000									
HCO_3^-	0.196	1.000								
Cl^-	0.592**	0.091	1.000							
SO_4^{2-}	0.018	−0.034	0.197	1.000						
Ca^{2+}	−0.199	−0.075	0.013	0.851**	1.000					
Mg^{2+}	−0.158	−0.144	0.099	0.895**	0.877**	1.000				
K^++Na^+	0.418**	0.418**	0.666**	0.497**	0.120	0.202	1.000			
全盐量 Total salt content	0.301**	0.259*	0.436**	0.918**	0.712**	0.753**	0.763**	1.000		
pH	0.547**	0.577**	0.298*	−0.494**	−0.497**	−0.549**	0.277	−0.167	1.000	
碱化度 ESP	0.681**	0.292*	0.648**	0.027	−0.071	−0.065	0.546**	0.281	0.632**	1.000

注：*相关性在0.05水平下显著；**相关性在0.01水平下显著 Note：* Correlation is significant at the 0.05 level；** Correlation is significant at the 0.01 level

显著的正相关关系，其中与SO_4^{2-}、K^++Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}相关系数较大，且差异达极显著水平，分别为0.918、0.763，0.753、0.712，SO_4^{2-}、K^++Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}是影响土壤盐分状况的主要离子。土壤pH与CO_3^{2-}、HCO_3^-差异达极显著水平，说明土壤酸碱性主要是由CO_3^{2-}、HCO_3^-两个离子含量所决定的。土壤碱化度又与CO_3^{2-}、pH差异达极显著水平，相关系数分别为0.681、0.632，说明土壤碱化度主要受控于CO_3^{2-}含量，这与赵秀芳等[21]的研究结果一致。

2.5　影响土壤盐分离子的主要因子

通过对CO_3^{2-}、HCO_3^-、Cl^-、SO_4^{2-}、Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^++Na^+、含盐量、pH、碱化度10个变量进行主成分分析，构建具有代表性的若干综合因子，来评价该地区土壤盐渍化状况（整个剖面），并计算主成分与各项指标的相关系数。按照累计贡献率大于85%、特征值大于1来确定主成分个数。

分析结果表明，前3个主因子的特征值大于1，第一、第二和第三主因子的特征值分别为4.04、3.59和1.13，所对应的方差贡献率分别为40.43%、35.87%和11.34%，累计方差贡献率87.64%。表明前3个主成分解释了原10个变量的信息中的绝大部分，损失量仅为12.36%。

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。从主成分载荷矩阵来看，第一主成分除与pH外，与其他指标均为正向负荷，说明第一主成分能较全面地反映该地区土壤的盐渍化状况。各指标系数大小能够很好地反映该指标对各主成分的贡献率，从主成分载荷（表2）来看，与第一主成分密切相关的是全盐量、SO_4^{2-}，得分系数分别为0.244、0.225，而这几个变量又与土壤全盐量呈极显著相关，故可以综合地反映了盐渍化土壤的盐化程度。此外Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^++Na^+也在第一主成分的因子变量中具有较高的正载荷。故第一主成分替代了10个原始因子中的全盐量、SO_4^{2-}、Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^++Na^+ 6个因子的作用。在第二主成分因子变量中，CO_3^{2-}与pH具有较其他变量更高的载荷，呈正相关，得分系数分别为0.247、0.220。由于pH是土壤碱化特征的重要指标之一，而CO_3^{2-}不仅是盐分离子组成，还代表了土壤总碱度，同时这两个变量又与土壤全盐量呈极显著相关，因此说第二主成分代表盐渍化土壤的碱化特征。第二主成分替代了10个原始因子中的CO_3^{2-}与pH 2个因子的作用。第三主成分中，HCO_3^-的载荷较高，呈正相关，得分系数为0.730。由于HCO_3^-是土壤总碱度的一部分，可以说第三主成分是第二主成分的补充因子，用以表示除CO_3^{2-}与pH等土壤碱化特征重要离子之外的其他离子含量状况。第三主成分仅替代了10个原始

表2 主成分因子的载荷矩阵和得分系数矩阵

Table 2 Rotated Component Matrix and Component Score Coefficient Matrix

	因子载荷矩阵 Rotated component matrix			成分得分系数矩阵 Component score coefficient matrix		
	主成分1 PC1	主成分2 PC2	主成分3 PC3	主成分1 PC1	主成分2 PC2	主成分3 PC3
CO_3^{2-}	0.348	0.790	−0.255	0.086	0.220	−0.225
HCO_3^-	0.242	0.466	0.828	0.060	0.130	0.730
Cl^-	0.468	0.573	−0.501	0.116	0.160	−0.442
SO_4^{2-}	0.911	−0.388	0.019	0.225	−0.108	0.017
Ca^{2+}	0.729	−0.551	0.077	0.180	−0.153	0.068
Mg^{2+}	0.779	−0.548	−0.027	0.193	−0.153	−0.024
K^++Na^+	0.743	0.546	0.053	0.184	0.152	0.047
全盐量 Total salt content	0.985	−0.025	0.136	0.244	−0.007	0.120
pH	−0.150	0.886	0.273	−0.037	0.247	0.241
碱化度ESP	0.363	0.762	−0.171	0.090	0.213	−0.150

因子中的HCO_3^- 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、SO_4^{2-}、CO_3^{2-}、HCO_3^-、pH作为研究区盐渍化土壤盐碱状况的特征因子。

3 讨 论

土壤全盐量、pH、阴阳离子组成、碱化度是盐渍化土壤最基本的特征，也是区域盐渍化土壤改良利用最基本的依据。内蒙古河套平原是我国较大的黄灌区之一，随着灌溉面积不断增加，河套平原土壤盐渍化面积不断增加，已成为河套平原农业发展亟需解决的问题。目前，在河套平原盐渍化土壤上采用水利、物理、化学、农艺、生物等措施，对区域盐碱地进行过不同规模的改良与利用，也取得了较好的效果，但这些成果主要基于区域盐分运移规律的精确掌握。本研究表明，河套平原弃耕地土壤盐碱化程度较重，0～60 cm土层土壤全盐量随土层深度增加而降低，60～120 cm土层土壤全盐量随土层深度增加而增加，盐分总体呈表聚和底聚的特征，剖面中阳离子以Na^++K^+为主，阴离子以SO_4^{2-}为主，这与李小刚等[22]在甘肃引黄灌区的研究结果一致，而与赵永敢[23]、李亮[24]在河套灌区得出土壤盐分表聚的结论并不一致，其原因是由于取样的区域特点不同所致。同时土壤各盐碱指标呈现强烈的空间变异特征，变异系数为中到强度变异，这与寇薇[25]在河套灌区的研究结果一致。

主成分分析方法是一种将多个指标化为少数几个综合指标的统计分析方法，提取出的每个主成分均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，也是一种综合的评价方法[26]。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，取得了重要进展。刘延峰等[20]用该方法研究了新疆焉耆盆地盐渍化土壤全盐量、pH及盐分离子的分别特征；姚荣江和杨劲松[27]用该方法研究了黄河三角洲地区典型地块土壤盐渍化特征，并对该地区土壤盐分剖面构型的分类进行了探讨；王海林[28]用该方法研究了青海东部共和盆地弃耕地盐碱化特征；王雪梅等[29]用该方法对新疆典型盐渍化区渭干河–库车河三角洲绿洲土壤盐分特征进行研究；麦麦提吐尔逊·艾则孜等[30]用该方法研究了新疆天山西部伊犁河流域土壤盐分特征；张体彬等[31]、樊丽琴等[32]用该方法分别研究了宁夏银北龟裂碱土和典型盐化土壤盐分、pH 和碱化度的空间分布特征；古丽格娜·哈力木拉提等[33]用该方法研究了喀什葛尔河流域盐渍化土壤盐分特

征；郭双双和王勇辉[34]用该方法研究了艾比湖流域不同植被类型覆盖条件下风沙土土壤含盐量、可溶性离子分布特征。与以上学者研究相比，本研究选择了土壤全盐量、pH、阴阳离子组成、碱化度等10个指标作为土壤盐渍化参数，能全面地代表区域土壤盐渍化特征的总体情况。同时与常规统计学方法相比，主成分分析结果更加直观。

4 结　论

研究区各层土壤盐碱化程度较重，具有明显的表聚和底聚特征。0～60 cm土层土壤全盐量随土层深度增加而降低，60～120 cm土层土壤全盐量随土层深度增加而增加。剖面中可溶性盐分阳离子以Na^++K^+为主，其次是Ca^{2+}；阴离子以SO_4^{2-}为主，其次是HCO_3^-。SO_4^{2-}、K^++Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}是影响土壤中盐分状况的主要离子。本研究认为，影响河套平原弃耕地土壤盐碱特征的主要因子有全盐量、SO_4^{2-}、CO_3^{2-}、HCO_3^-、pH。研究结果可为河套平原盐碱土改良与利用以及区域生态环境建设提供理论依据。

参 考 文 献

[1] 徐恒刚.中国盐生植被及盐渍化生态治理. 北京：中国农业科学技术出版社，2005：5
Xu H G. China's saline vegetation and saline ecological governance（In Chinese）. Beijing：China Agricultural Science and Technology Press，2005：5

[2] 毛任钊，田魁祥，松本聪，等. 盐渍土盐分指标及其与化学组成的关系. 土壤，1997，29（6）：326—330
Mao R Z，Tian K X，Song B C，et al. Salinity of saline soil index and its relationship with the chemical composition（In Chinese）. Soils，1997，29（6）：326—330

[3] 张小由，龚家栋，周茂先. 额济纳三角洲土壤盐分特征分析. 中国沙漠，2004，24（4）：442—447
Zhang X Y，Gong J D，Zhou M X. Analysis on characters of soil salinity in Ejin delta（In Chinese）. Journal of Desert Research，2004，24（4）：442—447

[4] 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. 现代农业，2011（1）：92—93
Hou Y M，Wang G，Wang E Y，et al. Research of causes of land salinization and analysis of treatment scheme of Hetao Irrigation Region（In Chinese）. Modern Agriculture，2011（1）：92—93

[5] 王静，刘湘南，黄方，等. 基于ANN 技术和高光谱遥感的盐渍土盐分预测. 农业工程学报，2009，25（12）：161—166
Wang J，Liu X N，Huang F，et al. Salinity forecasting of saline soil based on ANN and hyperspectral remote sensing（In Chinese）. Transactions of the CSAE，2009，25（12）：161—166

[6] Eldeiry A A，Garcia L A. Detecting soil salinity in alfalfa fields using spatial modeling and remote sensing. Soil Science Society of America Journal，2008，72（1）：201—211

[7] 张飞，塔西甫拉提·特依拜，丁建丽，等. 干旱区绿洲土壤盐渍化程度遥感定量评价. 生态环境学报，2009，18（5）：1822—1829
Zhang F，Tashpolat·Tiyip，Ding J L，et al. Qualified evaluating on salinization degree by the remote sensing in the arid oasis（In Chinese）. Ecology and Environmental Sciences，2009，18（5）：1822—1829

[8] Cai S M，Zhang R Q，Liu L M，et al. A method of salt affected soil information extraction based on a support vector machine with texture features. Mathematical and Computer Modelling，2010，51（11/12）：1319—1325

[9] 张红，杨建锋，章光新，等. 苏打盐渍土剖面盐分动态变化特征分析. 干旱区资源与环境，2007，21（4）：117—122
Zhang H，Yang J F，Zhang G X，et al. Analysis of salt dynamic characters in saline-sodic soil sections（In Chinese）. Journal of Arid Land Resources and Environment，2007，21（4）：117—122

[10] 张飞，丁建丽，塔西甫拉提·特依拜，等. 干旱区典型绿洲土壤盐渍化特征分析——以渭干河一库车河三角洲为例. 草业学报，2007，16（4）：34—40
Zhang F，Ding J L，Tashpolat Tiyip，et al. Analysis on characteristics of soil salinization in the arid regions：A case study in the delta oasis of Weigan and Kuqa Rivers（In Chinese）. Acta Prataculturae Sinica，2007，16（4）：34—40

[11] 杨帆，邓伟，章光新，等. 苏打盐渍土地区芦苇地土壤盐分离子空间变异与群落关系研究. 土壤学报，2008，45（4）：594—600
Yang F，Deng W，Zhang G X，et al. Spatial variation of soil salineions and its relations with vegetation community of *Phragmites australia* in a saline-sodic soil（In Chinese）. Acta Pedologica Sinica，2008，45（4）：594—600

[12] 伊克昭盟土壤普查办公室. 达拉特旗土壤. 1983：1—40
Office of Soil Survey of Yike ZhaoLeague. Dalad Banner soil（In Chinese）. 1983：1—40

[13] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京：中国农业出版社，

2000：152—200
Bao S D. Soil agricultural chemistry analysis（In Chinese）. Beijing：China Agriculture Press，2000：152—200

［14］ 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. 土壤学报，2012，49（4）：681—687
Han G H，Tashpolat·Tiyip，Mamatsawt，et al. Characterization of soil salinization in arid area based on canonical correspondence analysis（In Chinese）. Acta Pedologica Sinica，2012，49（4）：681—687

［15］ 赵秀芳，杨劲松，姚荣江. 基于典范对应分析的苏北滩涂土壤春季盐渍化特征研究. 土壤学报，2010，47（3）：422—428
Zhao X F，Yang J S，Yao R J. Characterization of soil salinization in mudflay of North Jiangsu Province on canonical correspondence analysis（In Chinese）. Acta Pedologica Sinica，2010，47（3）：422—428

［16］ 李学垣. 土壤化学. 北京：高等教育出版社，2001：213—278
Li X H. Soil chemistry（In Chinese）. Beijing：Higher Education Press，2001：213—278

［17］ 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. 土壤学报，2015，52（3）：706—712
Wang H Y，Li H L，Dong Z，et al. Salinization characteristics of afforested coastal saline soil as affected by species of trees in afforestation（In Chinese）. Acta Pedologica Sinica，2015，52（3）：706—712

［18］ 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. 干旱区资源与环境，2005，19（1）：149—153
Aahmat·nayup，Li W H，Xu H L. Research on distribution laws and features of soil in middle reaches of Tarim River（In Chinese）. Journal of Arid Land Resources and Environment，2005，19（1）：149—153

［19］ 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. 土壤，2009，41（4）：664—669
Guo Q E，Wang Y Q，Guo T W，et al. Correlation of soil salt Ions in orchard in semiarid saline regions（In Chinese）. Soils，2009，41（4）：664—669

［20］ 刘延峰，靳孟贵，金英春. 焉耆盆地土壤盐渍化状况的主成分分析. 干旱地区农业研究，2004，22（1）：165—171
Liu Y F，Jin M G，Jin Y C. Principal component analysis of soil salinization in Yanqi Basin（In Chinese）. Agricultural Research in the Arid Areas，2004，22（1）：165—171

［21］ 李彬，王志春，梁正伟，等. 苏打碱化土壤盐分离子与相关性分析. 土壤通报，2007，38（4）：653—656
Li B，Wang Z C，Liang Z W，et al. Distribution characteristics of ions in sodic soil and correlation analysis（In Chinese）. Chinese Journal of Soil Science，2007，38（4）：653—656

［22］ 李小刚，崔志军，王琳英. 甘肃景电灌区次生盐化土壤的性质及其发生机理. 土壤通报，2001，32（1）：4—8
Li X G，Cui Z J，Wang L Y. Properties and genetic mechanisms of the secondary salinized soils in Jingdian Irrigation Area of Gansu Province（In Chinese）. Chinese Journal of Soil Science，2001，32（1）：4—8

［23］ 赵永敢.“上膜下秸”调控河套灌区盐渍土水盐运移过程与机理. 北京：中国农业科学院，2014
Zhao Y G. The process and mechanism of integrated effects of plastic mulch and buried straw layer on soil water and salt movement in the Hetao Irrigation District（In Chinese）. Beijing：Chinese Academy of Agricultural Sciences，2014

［24］ 李亮. 内蒙古河套灌区耕荒地间土壤水盐运移规律研究. 呼和浩特：内蒙古农业大学，2008：40—47
Li L. Study on the transport of soil water and salt between irrigated land and saline land in Hetao Irrigation District（In Chinese）. Hohhot：Inner Mongolia Agricultural University，2008：40—47

［25］ 寇薇. 内蒙古河套灌区土壤水盐空间变异性研究. 兰州：西北师范大学，2008
Kou W. Study on spatial variability of soil water and salinity in He Tao Irrigation Area in Inner Mongolia，China（In Chinese）. Lanzhou：Northwest Normal University，2008

［26］ 赵益新，赵珂，沈庆航. 多因素主成分分析及其在生态环境研究中的应用. 西南民族大学学报（自然科学版），2008，34（2）：203—206
Zhao Y X，Zhao K，Shen Q H. Multi-factor principal components analysis and its application in study of ecological environment（In Chinese）. Journal of Southwest University for Nationalities（Natural Science Edition），2008，34（2）：203—206

［27］ 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. 干旱区资源与环境，2007，21（11）：106—112
Yao R J，Yang J S. Analysis on salinity characteristics and profile types of saline soils in theYellow River Delta（In Chinese）. Journal of Arid Land Resources and Environment，2007，21（11）：106—112

[28] 王海林. 共和盆地弃耕地盐碱化主成分分析. 草原与草坪，2008（6）：61—65
Wang H L. Principal component analysis of salinization abandoned farmland in Gong-he Basin（In Chinese）. Grassland and Turf，2008（6）：61—65

[29] 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. 干旱区资源与环境，2009，23（12）：183—187
Wang X M，Tashpolat· Tiyip，Chai Z P，et al. Analysis on the characteristics of ions in the typical salinification area of Xinjiang（In Chinese）. Journal of Arid Land Resources and Environment，2009，23（12）：183—187

[30] 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. 环境科学研究，2010，23（6）：774—781
Mamattursun·Eziz，Hamid·Yimit，Anwar Mohammad，et al. Characteristics of soil salinity in Lli River valley，western Tianshan Mountains（In Chinese）. Research of Environmental Sciences，2010，23（6）：774—781

[31] 张体彬，康跃虎，胡伟，等. 基于主成分分析的宁夏银北地区龟裂碱土盐分特征研究. 干旱地区农业研究，2012，30（2）：39—46
Zhang T B，Kang Y H，Hu W，et al. Studies on salinity characteristics of takyric solonetz in Ningxia Yinbei region based on principal component analysis（In Chinese）. Agricultural Research in the Arid Areas，2012，30（2）：39-46

[32] 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. 中国土壤与肥料，2012（6）：17—23
Fan L Q，Yang J G，Xu X，et al. Salinity characteristics and correlation analysis of saline soil in irrigation area of Ningxia（In Chinese）. Soil and Fertilizer Sciences in China，2012（6）：17—23

[33] 古丽格娜·哈力木拉提，木合塔尔·吐尔洪，于坤，等. 喀什葛尔河流域盐渍化土壤盐分特征分析. 干旱区资源与环境，2012，26（1）：169—174
Gulgine·Halmurat，Muhtar ·Turhun，Yu K，et al. Analysis on the characteristics of saline soil on Kashghar River valley（In Chinese）. Journal of Arid Land Resources and Environment，2012，26（1）：169—174

[34] 郭双双，王勇辉. 艾比湖流域风沙土盐分特征分析. 干旱地区农业研究，2013，31（5）：196—200
Guo S S，Wang Y H. Salinity analysis of sandy soil in Ebinur Lake basin（In Chinese）. Agricultural Research in the Arid Areas，2013，31（5）：196—200

Characteristics of Salinization of Deserted Farmland in Hetao Plain，China

JING Yupeng[1]　DUAN Yu[1†]　TUO Debao[1]　ZHAO Peiyi[1]　ZHANG Jun[1]　LU Suanzhu[2]

（1 *Institute of Resources Environment and Detection Technology*，*Inner Mongolia Academy of Agriculture and Animal Husbandry Sciences*，*Hohhot* 010031，*China*）

（2 *Bayannaoer Academy of Agricultural and Animal Sciences*，*Linhe*，*Inner Mongolia* 015000，*China*）

Abstract　【Objective】To explore characteristics of the salinization of deserted farmlands in the Hetao Plain.【Method】In this study soil samples were collected from the farmlands and analyzed with the classical statistics and principal component analysis methods for total salt content，pH，anion and cation composition，and distribution of alkalization degree.【Result】Results show that the abandoned farmlands in the Hetao plain were mild to severe in salinization，with soil salt content，pH and alkalization degree varying between 2.80 and 6.69 g kg^{-1}，9.20 and 9.69，and 10.97% and 33.33%，respectively and distributed similarly along the soil profile，that is，accumulating in the surface and bottom. The salt content decreased with soil depth in the 0～60 cm soil layer，increased with soil depth in the 60～120 cm soil layer. The cations in the soil profile were dominated with Na^+ and K^+ while the anions were with SO_4^{2-}. All the salinization indices，except soil pH，showed extremely strong spatial variability. Contents of SO_4^{2-}，Ca^{2+}，Mg^{2+} and total salt varied sharply from soil layer to soil layer.The correlations of Cl^- with K^+ and Na^+ declined in significance with soil depth. Soil pH and alkalization degree were significantly correlated with the content of CO_3^{2-}. Principal component analysis shows that the total salt and SO_4^{2-} could be used as diagnostic factors of soil salinization；

while CO_3^{2-}, HCO_3^- and pH as diagnostic factors of soil alkalization in this research area, explaining 88.74% of the total variance.【Conclusion】Therefore, it is quite obvious that the deserted farmlands in the Hetao Plain are severe in salinization degree, and it is essential to lower soil salinity or alkalinity, regulate soil ion composition and improve soil structure during the soil amelioration process. It is expected that this study may provide certain theoretical basis for ameliorating and utilizing salinized soil, and improving regional ecological environment of deserted farmlands in the Hetao Plain.

Key words Principal component analysis; Abandoned farmland; Salinization characteristics; Hetao Plain

（责任编辑：檀满枝）