

海湾泥 碱渣和粉煤灰混合基质在稳定入渗条件下离子及水盐动态研究

黄明勇¹, 张 桥², 王振宇¹, 伍 钧³, 张 清¹

(1.天津市盐碱地生态绿化工程中心, 天津 300457;2.四川省气象环境评价中心, 四川 成都 610072;3.四川农业大学资源环境学院, 四川 雅安 625014)

摘 要:通过对海湾泥、碱渣和粉煤灰最佳配比组合在积水稳定入渗条件下的水盐动态、离子组成以及是否存在脱盐碱化问题进行了研究。结果表明,该配比基质水盐动态可分为表层脱盐、盐峰下移及底土脱盐阶段,各层次脱盐所需要的时间和用水量因深度不同而不同,0~40 cm 层次达到脱盐标准需要 2~3 d,而底土层则需要 18 d。淋洗前的全盐含量是淋洗后的 63.5 倍,混合基质盐分的化学类型由 $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$ 型转变到 $\text{HCO}_3^-\text{-Ca}^{2+}$ 型,随着脱盐的进行,SAR 变化与全盐量(TS)变化存在显著的正相关,RSC 与全盐含量(TS)呈显著的负相关,当基质盐分降到 0.1% 以下时,SAR、RSC 值降到 1 以下,且没有出现 pH 上升的现象,说明该配比没有出现碱化问题。

关键词:混合基质;稳定入渗;离子组成;水盐动态

中图分类号:X781.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)05-1815-05

Ions and Water-Salt Dynamic of Artificial Soil with Dredged Sediment, Caustic Sludge and Coal Ash Under Steadily Infiltrated Condition

HUANG Ming-yong¹, ZHANG Qiao², WANG Zhen-yu¹, WU Jun³, ZHANG Qing¹

(1. Tianjin Salina Eco-landscaping Engineering Center, Tianjin 300457, China; 2. Sichuan Meteorological Bureau, Chengdu 610072, China; 3. College of Resource and Environment, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China)

Abstract: Water-salt dynamic, ions composition and desalted alkalization of artificial soil, which was mixed with dredged sediment, caustic sludge and coal ash in optimizing proportion, were studied under steadily infiltrated condition. The results indicated that the water-salt movement of the soil included three phases, desalination phase in upper layer, salt peak downshift phase and substratum desalination phase. Time consumed and water quantity used of each layers were different with depths, it would take 2~3 days for the total content of salt in 0~40 cm layer reaching desalting criterion, but subsoil was 18 days. The total content of salt in the soil reduced 63.5 times through washing salt, and the chemical type of the artificial soil was from $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$ to $\text{HCO}_3^-\text{-Ca}^{2+}$ with desalination. There were positively linear correlation between SAR value with total salt content, negatively linear correlation between RSC value and total salt content with desalination, SAR value and RSC value decreased to 1 when total salt content of the soil dropped to no more than 0.1%. The pH value did not rise, showing that the soil alkalization was not found in the course of desalination and the concentrations of ions had no harm to the growth of plant after the desalination.

Keywords: artificial soil; steadily infiltration; ions component; water-salt movement

碱渣是氨碱法生产纯碱过程中产生的白色沉淀物,俗称白泥。目前,全世界每年氨碱法生产纯碱产生碱渣近 2 000 万 t,我国每年氨碱法生产纯碱产生碱渣近 300 万 t^[1]。虽然国内外提出了很多综合利用的技

术方案,积累了很多经验,如将它用作建筑材料、筑路、回填、围海造地等^[2-6],土壤改良剂、畜禽饲料添加剂^[2,5,7],橡胶、塑料、造纸填料等^[2,7,8],燃煤脱硫剂^[6]等。但由于碱渣自身特性以及经济、技术等原因,都未能得到充分应用,目前大多数国家采用陆地堆放、筑坝拦渣、海洋倾倒等处理方法^[1,2]。海湾泥为沿海港口、入海河口或造陆吹填的含盐疏浚淤泥,由于含盐量高、渗透能力差等因素,一般难以直接利用。燃煤电厂和

收稿日期:2007-05-16

基金项目:国家科技支撑项目(2007BAD67B03)

作者简介:黄明勇(1969—),男,四川仪陇人,高级工程师,主要研究方向为废弃物利用与城市园林。E-mail :hmy5219@sina.com

制碱工业发展导致大量粉煤灰的排放,国内外主要用于建筑材料、混凝土掺合料、筑路、回填等^[9,10],在农业方面作为土壤改良剂、肥料等^[9-15],也可用于造纸、橡胶、塑料、油漆行业作涂料或填料以及用粉煤灰处理污水等^[10,16]。3 种固体废弃物大量存在于天津滨海地区,污染环境,严重制约地方经济建设。通过理化性质、矿质营养以及重金属含量分析表明将该 3 种废弃物作为园林绿化基质具有可行性^[17],但其盐分含量高及其在盐碱地区作为绿化种植基质的水盐运动状况是需要解决的主要问题之一。本文在通过土柱实验筛选出最佳配比的基础上^[18],在不考虑气候、地下水、植物、灌溉方式等因素情况下,对积水入渗条件下该配比的水盐运移规律、离子组成及是否存在脱盐碱化问题进行了研究。为 3 种废弃物综合利用、混合基质田间应用过程中水盐调控、排盐方式选择、次生盐碱化的防治、改良、植物选择和种植提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

海湾泥取自南疆码头取新吹填的海湾泥,10 个样点,每个点 200 kg,共计 2 000 kg,去除其中贝壳等杂物,室内风干,粉碎过 10 目筛(2 mm),混合均匀备用;在天津碱厂碱渣堆场取碱渣 1 000 kg,室内风干,剔除杂质,粉碎过 10 目筛;粉煤灰自天津市军粮城火电厂灰场取新近排放的粉煤灰 300 kg,室内风干,粉碎过 10 目筛。3 种废弃物的理化性质见表 1,全盐含量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)=(电导率-0.05)/0.375。

1.2 试验方法

观测筒采用直径 20 cm、长 168 cm 的 UPVC 塑料管。将最佳配比处理^[18]材料均匀地装入筒中,分层填装 150 cm,控制其容重为 $1.4\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。在距观测筒表层 20 cm 处安装第一只盐分传感器,以下各传感器的间距均为 20 cm,距表面 100 cm 以下间距增大为 40 cm,每个观测筒上有 6 只盐分传感器,探头插入土中

的深度为 5 cm。观测过程中土柱表面保持 10 cm 的水头,用装满水的 2 000 mL 容量瓶倒置保持水头平面恒定。观测筒最下部装有石英砂作为反滤层。用三角瓶收集滤液供分析用,设 3 次重复。

试验采用蒸馏水进行淋洗。试验开始时,每天观测 2 次,随着水盐运动的逐渐稳定,观测时间间隔逐渐加大,试验最后阶段每两天观测一次,记录盐分传感器读数。根据所得资料绘制实验过程中各层土壤中土壤溶液全盐随时间的变化曲线。当读数变化明显时测定淋洗液离子组成。试验进行至观测筒全剖面溶液全盐小于 $8\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ (对应的全盐含量小于 $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)时停止[全盐含量($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)=电导率 $\times 0.436-0.877$],记录淋洗耗水量为 36 850 mL,同时取混合基质各层次样品后混合,风干,粉碎过 10 目筛,备用。

1.3 样品分析

混合样及滤液全盐含量使用电导法(DDS-II 型电导仪),土样水土比为 5:1。pH 值使用酸度计法(瑞士万通 Metrohm 744 pH Meter),水土比为 1:1。 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、 Cl^- 采用电位滴定法(瑞士万通 Metrohm 716 DMS Titrino)。 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 采用 EDTA 滴定法。 Na^+ 、 K^+ 使用火焰光度计法(6400-A 型)^[19]。阳离子交换量 CEC(Cation Exchange Capacity)采用乙酸钠-火焰光度法测定。盐分传感器采用中国科学院南京土壤研究所研制的 TYC-II 型土壤盐分传感器。计算公式:碱化度($\%$)= $\text{Na}^+\times 100/\text{CEC}$ 、残余碳酸钠 RSC(Residual Sodium Carbonate)=($\text{HCO}_3^-+\text{CO}_3^{2-}$)-($\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$)、钠吸附附比 SAR(Sodium Absorption Ratio)

$$\text{SAR}=\text{Na}^+/\sqrt{(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/2}$$

2 结果分析

2.1 稳定入渗条件下混合基质水盐动态

淋洗期间基质表层长期保持恒定积水层,水分稳定入渗,最佳配比剖面从上到下逐渐为水分饱和,而后形成重力水流下渗,下渗水不断从观测筒底部流

表 1 3 种废弃物的化学性质
Table 1 Physical and chemical characteristics of the wastes samples

材料 material	pH*	全盐/g·kg ⁻¹ Total salt	阴阳离子含量/cmol·kg ⁻¹ , soil ionic components								渗透系数/cm·s ⁻¹ Infiltration coefficient
			CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	
海湾泥	8.21	19.7	0.020	0.540	31.25	2.24	1.20	4.28	0.52	27.79	10 ⁻⁷
碱渣	9.76	138.7	0.400	0.150	242.50	1.00	157.0	0.20	7.71	77.12	10 ⁻⁴ ~10 ⁻²
粉煤灰	8.82	1.9	0.040	0.330	1.25	0.78	2.10	0.51	0.00	2.07	10 ⁻⁴ ~10 ⁻³

注:* 水土比为 1:1 时测定值。
Note:*The ratio of water to soil is 1:1.

出,最佳配比所含的盐分随着下渗水流逐渐排出。试验结果表明可将试验过程中水盐动态划分为如下几个阶段:

(1)表层脱盐阶段:从图 1 所示最佳配比不同深度土壤溶液全盐变化曲线可以看出,表层 20 cm 深度土壤溶液全盐在灌水当天(6 h 后)由原始的 4.0 ms·cm⁻¹ 迅速上升到 25.6 ms·cm⁻¹, 形成一个土壤溶液浓度最高的土壤层次,可称之为盐峰。这标志着上层土壤显著脱盐的开始。在这个阶段内,盐峰以下的土层中土壤溶液的浓度变化不大。

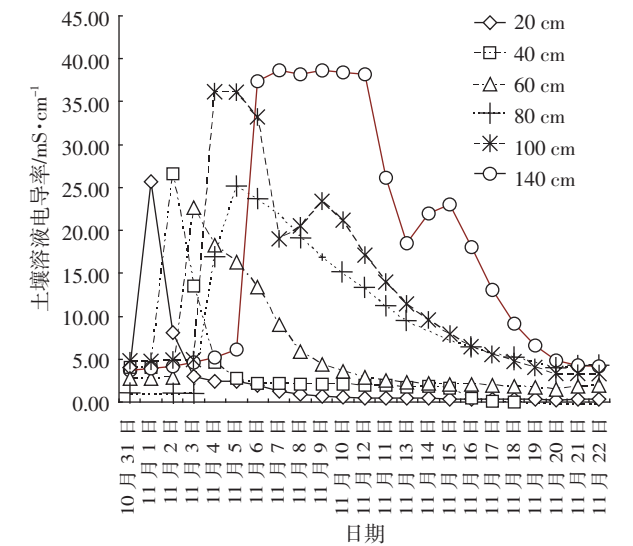


图 1 淋洗期间全盐变化曲线

Figure 1 Changes of soil solution concentration during the washing process

(2)盐峰下移阶段:随着水的不断渗入,表层土壤溶液浓度降低,当水盐动态观测筒底部有水排出时,整个土壤剖面均为水所饱和。各土层中的含盐溶液均向下一个土层运动并同时接受上一个土层下移的盐溶液,此时各土层的土壤溶液浓度均有变化,盐峰逐渐下移。由于表层盐分大部分移入下一层,因而土壤溶液浓度迅速降低。20 cm 基质溶液全盐在入渗 1 d 后就下降到脱盐标准以下,7 d 后下降到 1 mS·cm⁻¹ 以下(0.94 mS·cm⁻¹)。而表层以下的土层,除本身含盐外,还要承接上部土层中的盐分,因而脱盐较慢。100 cm 深度土壤溶液全盐连续 10 d 都大于 20 mS·cm⁻¹,140 cm 深度土壤溶液全盐连续 6 d 都大于 35 mS·cm⁻¹。20、40、60、80 cm 土层形成盐峰过后,土壤溶液全盐一直处于下降状态;而 100、140 cm 土层在形成盐峰过后,土壤溶液全盐也呈下降趋势,但在下降过程中有一个小的反弹,这与上部土层的盐分不断地被淋洗

到下部土层有关。

(3)底土脱盐阶段:在盐峰逐渐下移的过程中,由于上面土层所有盐分都向下移动到底土层次,所以该层仍然有盐峰出现,并且是上部土层盐峰累积的结果,其峰值明显高于上部土层。从图 1 可以看出底土层的盐峰峰值是 38.6 ms·cm⁻¹。随着该层盐峰的逐渐减弱,底土层开始脱盐。但是该层土壤的脱盐速度更加缓慢。20 cm 层次达到脱盐标准需要 2 d,而底土层则需要 18 d。当全剖面土壤溶液全盐逐渐平缓,最终达到基本不变时,通体盐分含量已经达到植物正常生长的要求。

以上可见混合基质各层次脱盐所需要的时间因深度不同而不同。回归分析表明盐峰下移深度与淋洗水量呈直线相关关系 $y=0.007x-7.3077$ ($r=0.97$)(见图 2),在实践中可根据该脱盐特点采取分层脱盐措施,以达到节水和满足生产需要。

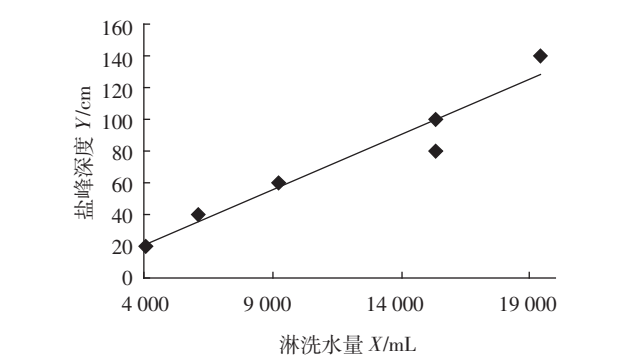


图 2 盐峰下移深度与淋洗水量的关系

Figure 2 The relationship between the salt peak value and the amount of washing water

2.2 全盐及离子组成分析

2.2.1 混合基质淋洗前后全盐及离子组成分析

由表 2 可见混合基质在淋洗前后全盐含量变化显著,淋洗前的全盐含量是淋洗后的 63.5 倍。离子组成方面,除 HCO₃⁻ 离子含量上升外,其余离子含量均下降,混合基质盐分的化学类型由 Na⁺-Cl⁻型转变到 HCO₃⁻-Ca²⁺型。

表 2 淋洗前后配比的化学性质分析

Table 2 Chemical characteristics of the treatment before and after leaching process

时间 time	pH	全盐/g·kg ⁻¹ Total salt	阴阳离子含量/cmol·kg ⁻¹ , soil ionic components							
			HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
淋洗前	9.10	38.1	0.100	0.075	1.55	68.75	25.68	2.08	2.34	32.54
淋洗后	8.43	0.6	0.65	0	0.00	0.13	1.05	0.30	0.29	0.00

2.2.2 滤液

随着淋洗次数的增加,滤液中 Na⁺、Cl⁻离子绝对含量逐渐减少,且下降速度非常快,如 Cl⁻最初含量为 50.9 cmol·L⁻¹,经过 120 h(达到脱盐要求所经历的时间)即降低到 0.485 cmol·L⁻¹,下降了 104 倍。它们与含盐量变化均存在极显著正相关 $Y=1.227\ 8x_1+0.045\ 8$ ($r=0.999^{**}$), $Y=0.467\ 1x_2+0.164\ 9$ ($r=0.999^{**}$),式中 Y 为含盐量 (g·L⁻¹), x_1 为 Na⁺含量 (cmol·L⁻¹), x_2 为 Cl⁻含量 (cmol·L⁻¹)。Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻、K⁺绝对含量随含盐量的降低而逐渐减少。但其下降速度比 Na⁺、Cl⁻慢。HCO₃⁻含量的变化趋势比较特殊,当滤液全盐量大于 1 g·L⁻¹时,随着含盐量的下降,HCO₃⁻含量逐渐上升,但幅度不大;当滤液全盐量小于 1 g·L⁻¹时,随着含盐量的下降,HCO₃⁻含量逐渐降低。试验中未检测出 CO₃²⁻。

由于各离子的迁移能力不同,在淋洗过程中,Ca²⁺的相对含量逐渐占阳离子主导地位,HCO₃⁻占阴离子的主导地位。滤液盐分的化学类型由 Na⁺-Cl⁻型转变到 HCO₃⁻-Ca²⁺型(表 3)。

表 3 淋洗过程中滤液的盐分变化
Table 3 The changes of salts in the leaching solutions during the column washing process

时间/h Time	pH	全盐/g·L ⁻¹ Total salt	阴阳离子含量/cmol·L ⁻¹ , soil ionic components							
			HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
24	4.19	24.04	0	0	0.917	50.9	3.2	0.2	0.87	19.51
72	7.1	11.49	0.233	0	0.739	24.69	0.8	0.08	0.395	9.36
120	7.42	0.62	0.15	0	0.163	0.485	0.184	0.008	0.143	0.802
168	7.58	0.39	0.147	0	0.146	0.325	0.054	0	0.059	0.353
216	7.54	0.29	0.145	0	0.133	0.242	0.047	0	0.05	0.1
264	7.58	0.25	0.145	0	0.082	0.227	0.041	0	0.04	0.078
312	7.65	0.18	0.143	0	0.019	0.163	0.036	0	0.034	0.022
360	7.68	0.16	0.142	0	0.012	0.124	0.033	0	0.033	0.02
384	7.69	0.15	0.142	0	0.012	0.096	0.032	0	0.033	0.019

2.3 脱盐过程中碱化问题及 pH 变化研究

盐土脱盐碱化是自然界碱化土壤形成的原因之一。^[20-22]关于碱化过程的实质,一般认为是土壤吸收性复合体从土壤溶液中吸附钠离子的过程^[23-26]。国外一般采用钠碱化度作为碱土的划分指标,至于各种碱化土壤碱化程度的划分,各国根据本国的实际情况提出了自己的分级标准^[22,25,27]。本研究采用 pH、总碱度(CO₃²⁻+HCO₃⁻)、碱化度、钠吸附比(SAR)4 个参数^[22,26]作为评价标准。

2.3.1 混合基质

从表 4 可以看出,混合基质在淋洗后 pH 较淋洗前下降,淋洗前后基质的 SAR 降幅很大,而 RSC 在淋洗前后均为负值,说明[CO₃²⁻+HCO₃⁻]浓度一直小于[Ca²⁺+Mg²⁺],淋洗前后混合基质的碱化度都为 0,说明代换性钠很低。

表 4 淋洗前后混合基质各盐渍性状的变化
Table 4 The changes of salinization properties of the treatment before and after washing

时间	全盐/g·kg ⁻¹	pH	SAR	RSC	碱化度
淋洗前	38.1	9.10	19.53	-550	0
淋洗后	0.6	8.43	0	-20.5	0

2.3.2 滤液

从表 5 可以看出滤液的 SAR 变化趋势与滤液全盐量变化趋势一致,随含盐量下降而逐渐下降,SAR 变化与全盐量(TS)变化存在显著的正相关($TS=0.191\ 6e^{0.138\ 7SAR}$, $r=0.99^{*}$),滤液的 RSC 变化趋势与滤液全盐量变化趋势相反,在整个淋洗过程中 RSC 与全盐含量(TS)呈显著的负相关($TS=-0.006\ 6RSC^2-0.792\ 6RSC+0.516\ 6$, $r=0.99^{*}$),滤液 pH 值的变化显现出波动性,一般是先上升、再下降,再上升,当滤液全盐量下降到小于 0.2 g·L⁻¹时,滤液 pH 值变得较稳定。在整个实验过程中滤液的 pH 值均不超过 8。

表 5 淋洗试验滤液各盐渍性状的变化
Table 5 The changes of salinization properties of leaching solutions during the washing process

Time	24 h	72 h	120 h	168 h	216 h	264 h	312 h	360 h	384 h
TS/g·L ⁻¹	24.04	11.49	0.62	0.39	0.29	0.25	0.18	0.16	0.15
pH	4.19	7.1	7.42	7.58	7.54	7.58	7.65	7.68	7.69
SAR	33.46	31.55	5.79	4.80	1.46	1.22	0.37	0.33	0.34
RSC	-68	-15.27	-2.34	0.39	0.51	0.63	0.71	0.76	0.78

在脱盐过程中,滤液 pH 变化不大的原因是含碳酸钙的石灰性土壤,其 pH 由 CaCO₃ 的水解所决定:CaCO₃+H₂O⇌Ca²⁺+HCO₃⁻+OH⁻,因为 HCO₃⁻的化学平衡受 CO₂ 的影响,所以石灰性土壤的 pH 主要由 CO₂ 的含量来决定。由于该混合基质含有 CaCO₃(碱渣的主要成分就是碳酸钙),可以认为其 pH 主要由 CO₂ 的含量来决定。在理论上,根据碳酸钙的溶解度,水中的二氧化碳量及碳酸的离解常数,可以得出其关系式为:pH=6.03-2/3LogP_{CO₂}^[12]。可以看出土壤空气中 CO₂ 的浓度越高,土壤的 pH 越低。在脱盐过程中,混合基质由于一直处于积水入渗状态,试验又在室内进行,空气中可含 CO₂0.2%~0.7%,所以在淋洗脱盐过程中

混合基质滤液的 pH 可比较稳定地保持在 7.3~7.8。以上分析表明随着脱盐的进行,该配比没有出现碱化问题,且没有出现 pH 上升的现象。

3 结论

以上试验结果分析表明稳定入渗条件下最佳配比剖面的水盐动态可划分为表层脱盐、盐峰下移和底土脱盐三个阶段,各层次脱盐所需要的时间因深度不同而不同。达到脱盐标准时各盐渍性状满足植物生存要求,在脱盐过程中不存在碱化问题,脱盐后也没有出现 pH 上升的现象,脱盐后基质的离子浓度不会对植物的生长产生毒害作用,说明采用最佳比例来配制绿化种植基质是可行的。同时,在实践中可根据该基质上层脱盐快于下层的特点采取分层脱盐培肥措施,以达到节水和满足绿化建设需要,同时辅以地下排盐工程措施解决深层排水问题,从而达到脱盐的目的。

参考文献:

- [1] 刘广远,韩庚辰,于 涛,等. 碱渣海洋倾倒定点化学追踪试验[J]. 海洋环境科学, 1995, 14(5):61-67.
- [2] 刘心中,姚 德,董凤芝,等. 碱渣(白泥)综合利用[J]. IM&P 化工矿物与加工, 2001, (3):1-4.
- [3] 叶国良,苗中海. 碱渣的综合利用[J]. 港口工程, 1998, 1:10-21.
- [4] 徐建新,张建国. 浅谈碱渣的基本性质[J]. 建筑技术开发, 1998, 25(5):35-36.
- [5] 黄小红,柯玉诗,凌德全. 碱渣的农用效果研究初报[J]. 广东农业科学, 2000, (4):35-37.
- [6] 彭铁成,刘宗瑜. 碱渣用于湿式烟气脱硫的研究[J]. 天津理工学院学报, 1999, 15(增刊):54-56.
- [7] 娄性义,张焕云,闫慎杰. 碱渣(白泥)综合利用途径的探讨[J]. 青岛建筑工业学院学报, 1999, 20(2):55-60.
- [8] 茅爱新. 氨碱法纯碱生产中废液及废渣的综合利用[J]. 化学工业与工程技术, 2001, 22(2):31-32.
- [9] 聿振明,高忠爱,祁梦兰,等. 固体废物的处理与处置[M](修订版). 北京:高等教育出版社, 1993. 267-286.
- [10] 贾德义,陈艳玲,郭万宝. 粉煤灰资源综合利用系统分析[J]. 资源节

约与综合利用, 1994, (2):44-46.

- [11] 严彩霞,董健苗. 粉煤灰在农业方面的利用[J]. 粉煤灰综合利用, 2001, (5):41-44.
- [12] 吴加华,刘宝山,董云中,等. 粉煤灰改土效应研究[J]. 土壤学报, 1995, 32(3):334-340.
- [13] 吴加华,董云中,刘宝山,等. 粉煤灰中有害元素对土壤、粮食影响的初步评价[J]. 土壤学报, 1995, 32(2):194-201.
- [14] 马小明,郝志邦. 粉煤灰农业工程应用技术研究[J]. 内蒙古环境保护, 1995, 7(4):11-12, 19.
- [15] 毛景东,杨国治. 粉煤灰资源的农业利用[J]. 农村生态环境, 1994, 10(3):73-75.
- [16] 王 福. 粉煤灰利用技术现状和发展方向探讨 [J]. 粉煤灰, 1995, (3):6-12.
- [17] 黄明勇,路福平,郭育文. 碱渣、海湾泥和粉煤灰在城市园林绿化中的应用研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2):748-753.
- [18] 张万钧,郭育文,黄明勇,等. 三种固体废弃物综合利用的研究[J]. 中国工程科学, 2002, 4(1):62-66.
- [19] 中国土壤学会. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000.
- [20] 李加宏,俞仁培. 水-土壤-植物系统中盐分的迁移和植物耐盐性研究进展[J]. 土壤学进展, 1995, 23(6):9-20.
- [21] 俞仁培. 土壤次生碱化问题[C]//俞仁培. 土壤水盐动态和盐碱化防治. 北京:科学出版社, 1987. 36-42.
- [22] 俞仁培,张绍德,石万普,等. 黄淮海平原土壤次生碱化的预测与防治[C]//俞仁培,尤文瑞. 土壤盐化、碱化的监测与防治, 北京:科学出版社, 1993. 90-96.
- [23] 杨道平,俞仁培. 土壤碱化过程和碱化实质的研究Ⅱ. 交换性钠的解离[C]//俞仁培. 土壤水盐动态和盐碱化防治, 北京:科学出版社, 1987. 103-110.
- [24] 杨道平,俞仁培. 土壤碱化过程和碱化实质的研究Ⅳ. 氯化钠和硫酸钠对土壤碱化的作用[C]//俞仁培,尤文瑞. 土壤盐化、碱化的监测与防治, 北京:科学出版社, 1993. 152-159.
- [25] 宋新山,邓 伟,章光新,等. 钠吸附比及其在水体碱化特征评价中的应用[J]. 水利学报, 2000, (7):70-76.
- [26] 朱祖祥. 土壤学·下册[M]. 北京:农业出版社, 1983. 350-351
- [27] 俞仁培,石万普,张绍德,等. 黄淮海平原碱化土壤的分级[C]//俞仁培,尤文瑞. 土壤盐化、碱化的监测与防治, 北京:科学出版社, 1993. 83-87.
- [28] 于天仁. 土壤化学原理[M]. 北京:科学出版社, 1987. 352-353.