

废水土地处理技术在沙地生态工程建设中的应用

李培军^{1,2}, 王治江^{1,2}, 孙铁珩^{1,2}, 台培东¹, 常士俊¹, 熊先哲¹, 李颖梅³

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 内蒙古鄂尔多斯东方集团, 鄂尔多斯 017000)

摘要: 研究在库布其沙地植被快速恢复中利用慢速渗滤土地处理技术实现电厂废水无害化、资源化的可行性。土地处理系统植物为乔木、灌木与牧草, 分别选取新疆杨(*Populus alba* Var. *Pyramidalis bunge*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)与黄花草木樨(*Melilotus suaveolens*)。设计了高(H, 3 000 mm 布水)、中(M, 1 500 mm)和低(L, 移栽时少量布水)3 个水力负荷实验区。运行结果说明, 电厂废水的预处理采用沉淀池和贮水塘的组合, 净化功能好, 出水可作为植物的灌溉用水。试验结果表明, M 区和 H 区新疆杨树冠体积为 L 区(对照)的 1.07 倍和 2.21 倍; 草木樨的年产量为 L 区的 2.33 倍和 3.0 倍; 沙棘株高为 L 区的 1.08 倍和 1.32 倍。在设计的 3 个水力负荷中, 植物的生长状况与水力负荷呈明显正相关关系, 高水力负荷不会对作物的品质造成影响, H 区草木樨中的重金属含量(Cd 0.021 mg/kg, Pb < 0.001 mg/kg, Cr < 0.01 mg/kg, As 0.043 mg/kg)远远低于粮食、蔬菜的食品标准, 因此牧草饲用是安全的。废水在本地区是一种宝贵的资源, 合理开发利用, 对于生态建设和高效农牧业的发展可产生重要的经济效益和生态效益。

关键词: 库布其; 土地处理技术; 沙地; 生态工程

中图分类号: X703.1 X171.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2005)03-0073-05

Application of Wastewater Land Treatment Technique to the Construction of Ecological Engineering in Sand Land

LI Pei-jun^{1,2}, WANG Zhi-jiang^{1,2}, SUN Tie-heng^{1,2}, TAI Pei-dong¹, CHANG Shi-jun¹, XIONG Xian-zhe¹, LI Ying-mei³

(1. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. Dongfang Group Erdos Inner Mongolia, Erdos 017000, China)

Abstract: In this paper a studies on the feasibility of harmlessness and resource of wastewater, which was discharged from a thermal power plant, by using slow rate filtration of land treatment technique for the fast recovery of vegetation in the Kubuqi sand land were carried out. The selected arbor, shrub and herbage in the land treatment system were poplar (*Populus alba* Var. *Pyramidalis bunge*), seabuckthorn (*Hippophae rhamnoides*) and sweet clover (*Melilotus suaveolens*) respectively. Three levels of wastewater hydraulic loading were designed in the field pilot experiment. They were high plot with 3000 mm/a irrigation (H), medium plot with 1500 mm/a irrigation (M) and low plot (L) with small volume of irrigation only used in the period of transplant seedlings. The performance indicate that the purification function of power plant wastewater by pre-treatment through combination of precipitation pool with storage ponds is effective and therefore the effluent after pretreatment can be used to irrigation vegetation. The experiment results show that the volume of tree crown for poplar in H plot and M plot was up to 1.07 and 2.21 times comparing with L plot respectively. The annual yield (dry weight) of sweet clover in H plot and M plot was up to 2.33 and 3.0 times comparing with L plot respectively. The height of seabuckthorn in H zone and M plot was up to 1.08 and 1.32 times comparing with L plot respectively. There is direct proportion between growth status of vegetation and hydraulic loading of irrigation. The contents of heavy metals for sweet clover (Cd 0.021 mg/kg, Pb < 0.001 mg/kg, Cr < 0.01 mg/kg, As 0.043 mg/kg) are much lower than the food standards of grain and vegetables, therefore the sweet clover for raising livestock is safe. Wastewater in this area is valuable source. Its reasonable utilization can contribute important benefits in economy and ecology in the ecological construction and developing effective agriculture and animal husbandry.

Key words: Kubuqi; land treatment technique; sand land; ecological engineering

土地处理技术是运用生态学原理结合工程学方法而形成的生态工程水处理技术。污水土地处理系统(LTS)是将污水有节制地投配到土地上,通过土壤-植物系统物理、化学、生物的吸附、过滤与净化作用和自我调控功能,使污水中可生物降解的污染物得以降解、净化,其氮、磷等营养物质和水分得以再

收稿日期: 2004-06-09; 修订日期: 2004-09-20

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(2002AA601022); 中俄自然资源与生态环境联合研究中心基金项目; 中国科学院沈阳应用生态研究所创新项目(SCXZ Y0108); 沈阳环境工程重点实验室基金资助项目(04002)

作者简介: 李培军,男,(1950~),研究员,教授,博士研究生导师,主要从事污染生态学和生态环境工程学研究,发表论文 110 篇。

利用,促进绿色植物生长并获得增产^[1].关于土地处理技术国内外已有很多研究和成功的处理工程^[2~8],干旱-半干旱地区水资源短缺是生态环境建设的限制因素之一,李培军等人^[9]在内蒙古霍林河矿区研究了森林-慢速渗滤处理——利用结合型土地处理技术,霍林河污水土地处理系统已成功运行多年,实践证明,在干旱-半干旱地区生态建设中实现污水资源的利用,有助于增加镶嵌型复合生态系统的稳定性,加速人工林的成林郁闭,增加林木蓄积量,明显改善草原地区生态环境质量.

库布其七里沙地区由于降雨量小,蒸发量大,地面与地下水资源短缺成为沙地植被恢复的主要限制因素.因此筛选适生耐旱植物品种和开发水资源成为本项目的重要研究内容.调查发现七里沙示范工程附近有一大型火力发电厂,每天排放大量废水,除部分废水经过处理循环再利用外,每天废水净产生量为 4500 m³,排放到电厂东南 5 km 处的 4 个贮水塘中.这些废水如能实现无害化利用,将在很大程度上缓解本地区水资源短缺的问题.为此,笔者开展了电厂废水土地处理系统试验研究.

1 研究地区概况

项目区地处库布其沙地中段,内蒙古自治区鄂尔多斯市达拉特旗境内,区域范围东经 109°48′~110°48′,北纬 40°10′~40°20′,具体地点为库布其沙地中段七里明沙区,该地区干旱多风,属沙漠气候,降水量为 310.3 mm/a,蒸发量为 2 147.7 mm/a.本地区土壤成土过程微弱,富含未风化砂粒,结构松散,有机质贫乏,属于典型的风沙土,其理化性质见表 1.该示范工程附近的 4 个贮水塘,还有煤干石、粉煤灰堆放场,连同荒地、沙丘,分布区域占地约 500 h m².电厂内有 2 个沉淀池,另加 2 号、4 号贮水塘作为本试验土地处理系统的预处理组成部分.

表 1 实验区土壤理化性质

Table 1 Physico-chemical characteristics of soil in the experimental area								
样品	pH	有机质 / %	速效/ mg·kg ⁻¹			全量/ %		
			N	P	K	N	P	K
本底	7.10	0.36	17.00	2.10	60.23	0.019	0.018	0.81

2 实验设计与研究方法

2.1 实验设计

(1) 试验地点 库布其沙地某电厂外 4 号贮水塘北面,原为生长杂草的沙地.地下水水位埋深 2~

5 m,储量极小,无开采价值.

(2) 试验用水 电厂排放到 2 号和 4 号贮水塘中的废水.

(3) 试验区设计 小区长 21 m,宽 10 m,面积 210 m².

(4) 水力负荷 共设 3 个水力负荷,即低水力负荷(L,对照)只在春季栽苗期为保苗灌溉,中水力负荷(M,1500 mm 灌水)和高水力负荷(H,3000 mm 灌水).L 区、M 区和 H 区各有 3 个小区(a、b、c),分别种植不同的植物.M 区和 H 区的布局同 L 区如图 1 所示.

(5) 供试植物 乔木为新疆杨(*Populus alba* Var. *Pyramidalis bunge*),3 年生树苗;灌木为沙棘(*Hippophae rhamnoides*),1 年生树苗;牧草为黄花草木樨(*Melilotus suaveolens*)种子.新疆杨树苗行距 3 m,株距 2.5 m;沙棘条栽行距 1.5 m,株距 1 m;黄花草木樨每区设 20 个布水单元,每单元 3 行,种子宽幅条播,行距 0.6 m.

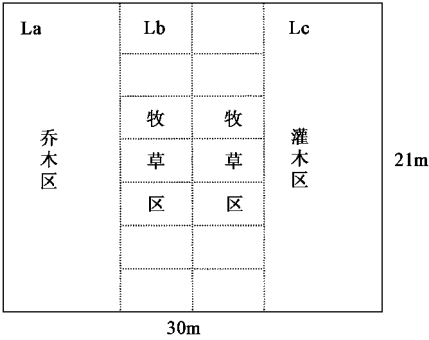


图 1 土地处理系统试验区示意图(以 L 区为例)

Fig.1 Sketch map of experimental plot for land treatment engineering (Low plot for example)

2.2 研究方法

按照利用型土地处理系统设计,工艺流程见图 2.本试验地点选择的原则是离贮水塘近,取水方便.试验地土壤具有代表性,属于典型的风沙土,土壤渗透系数(K 值)经测定为 1.08 m/d,属于渗透率较快的土壤类型.用抽水泵流量与时间来计算灌水量,灌水方法是采用沟灌方式进行,每周灌溉 1 次,各小区按照不同的水力负荷进行灌溉.除运行管理外,在生长季节分别考察作物的生长状况.

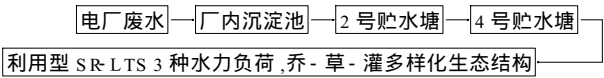


图 2 利用型土地处理系统工艺流程

Fig.2 The technological flow of land treatment system

2.3 分析方法

pH 采用电极法;化学耗氧量(COD) 重铬酸钾法;酚用蒸馏提取、4-氨基安替比林萃取光度法;氮(TN、NH₄⁺-N) 凯氏消煮、蒸馏-酸滴定法;磷(TP) 钼锑抗分光光度法,见文献[11]。水、土壤样品中重金属(Cd、Pb、Cu、Cr、Hg、As) 和可溶盐(HCO₃⁻、CO₃²⁻、Cl⁻、SO₄²⁻、Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、K⁺) 的测定见文献[11、12]。

3 结果与讨论

3.1 电厂废水水质及预处理效果

该电厂是我国大型火力发电厂之一,它的废水是由厂区的工业废水、生活污水、灰场澄清、煤场排水和冷却水等组成,其废水水质及预处理效果见表 2 和表 3。

预处理是污水土地处理系统的重要组成部分,一般采用一级处理、强化一级处理、沉淀池、贮水塘和各种氧化塘等前处理单元。本试验沉淀池和贮水塘作为污水一级处理,贮水塘除净化作用外还可冬贮。从表 2 和表 3 可以看出电厂排出水中 COD、TN、NH₄⁺-N、TP、Cd、Cr 和 SO₄²⁻ 7 个指标超过地面水 5 级标准;同时重金属 Cd 和 Cr 还超过农灌标准。2 号贮水塘对 NH₄⁺-N、TN 和 TP 的去除率分别为 57.01 %、51.74 %和 12.50 %,Cd 和 Cu 的去除率为 14.28 %和 35.48 %。后经 4 号贮水塘进一步处理,TP、Cd、Pb 和 Cr 净化效果较好。2 号和 4 号贮水塘为串联系统,因此比单塘净化效率高。通过 2 级贮水塘的预处理,出水只有 COD、TN、SO₄²⁻ 超出地面水 5 级标准,总盐分、pH 和 Cd 接近和略高于灌溉标准,其它指标均符合灌溉水质标准,可以用于灌溉林

表 2 电厂废水可溶性盐测定结果/ mg·L⁻¹

Table 2 Soluble salts in wastewater discharged from thermal power plant/ mg·L⁻¹

水样种类	pH	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ + K ⁺	总盐量
沉淀池进水	7.6	195.39	204.64	299.97	57.37	64.99	161.48	983.85
贮水塘出水	7.5	215.60	184.51	260.63	97.33	49.37	120.70	928.14
地面水标准 ¹⁾	6.5~8.5	≤250		≤250				
农田灌溉水标准 ²⁾	5.5~8.5	≤200						≤1000

1) 地面水环境质量标准 GB3838-88,一类水 2) 农田灌溉水 GB5084-85,一类水(非盐碱土地区 ≤1000 mg/L,盐碱土地区 ≤2500 mg/L)

表 3 废水水质及预处理效果/ mg·L⁻¹

Table 3 Characteristics of wastewater and the purifying effects of pre-treatment / mg·L⁻¹

分析项目	沉淀池进水	2 号贮水塘	去除率 ¹⁾ / %	4 号贮水塘	去除率 ²⁾ / %	地面水标准(5 级)	农灌水标准
pH	8.29	8.25		9.02		6~9	5.5~8.5
COD	27.30	25.60	6.23	38		25	
酚	0.003	0.003				0.1	1.0
NH ₄ ⁺ -N	0.21	0.09	57.14			0.2	
TN	5.72	2.76	51.74	5.68		2	
TP	0.24	0.21	12.50	0.013	93.81	0.2	
Cd	0.014	0.012	14.28	0.005	58.33	0.01	0.002
Pb	0.036	0.048	-	0.025	47.92	0.1	0.5
Cu	0.062	0.040	35.48			1.0	1.0
Cr	0.172	0.181		0.088	51.38	0.1	0.1
Hg	<0.00005	<0.00005				0.001	0.001
As	<0.0001	<0.0001				0.1	水田:0.05 旱田:0.1

1) 2 号贮水塘净化效果 2) 4 号贮水塘净化效果

地和牧草。

3.2 试验区植物生长状况

图 3、图 4 和图 5 是 3 种不同类型的植物,于 7 月和 9 月生长状况的测定结果。图 3 是试验区新疆杨的生长状况调查结果,每次测定 28 棵树,取平均值作图。实验结果说明,经过 1 个生长季节(04-25 ~

09-21),新疆杨树冠体积 M 区和 H 区为 L 区(对照)的 1.07 倍和 2.21 倍;树高、茎粗也有明显的增加,但树冠完全是试验期间生长出来的,所以树冠可说明灌溉的显著效果。

图 4 是试验区黄花草木樨生长量测定结果,草木樨的年产量 L 区、M 区和 H 区的鲜重分别为

0.55kg/m²、1.30kg/m² 和 1.50kg/m²，M 区和 H 区为 L 区的 2.36 倍和 2.73 倍；干重分别为 0.15 kg/m²、0.35kg/m² 和 0.45kg/m²，M 区和 H 区为 L 区的 2.33 倍和 3.0 倍。

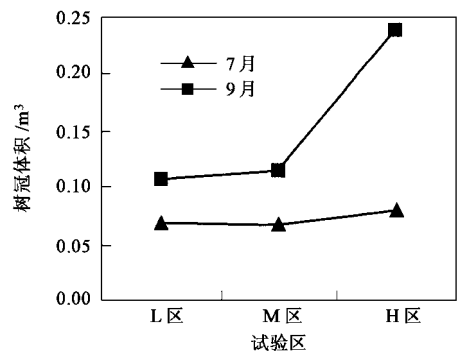


图 3 新疆杨树冠生长状况
Fig.3 Tree crown growths of poplar under different hydraulic loadings

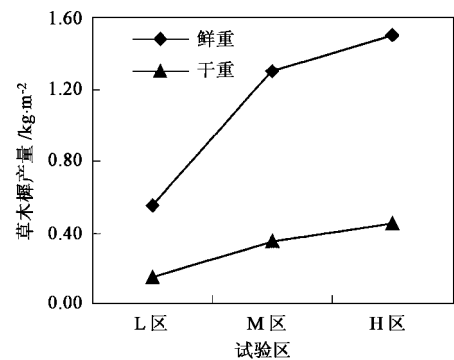


图 4 草木樨生长状况
Fig.4 Growths of sweet clover under different hydraulic loadings

图 5 是沙棘的生长效果，尤其生长前期干旱缺水，灌水效果更为明显。07-14 采样（生长 80d 后），

L 区、M 区和 H 区沙棘的株高分别达到 11.7cm、24.0 cm 和 26.7 cm，M 区和 H 区比 L 区的株高增加 105.1 %和 128.2 %。8 月~9 月下雨较多，这 2 个月差异不大。09-21 M 区、H 区和 L 区株高分别达到 27.4cm、29.6 cm 和 36.2 cm，沙棘株高 M 区和 H 区为 L 区的 1.08 倍和 1.32 倍。在设计 3 个水利负荷中，乔、草和灌 3 种植物的生长状况均与水力负荷呈正比。

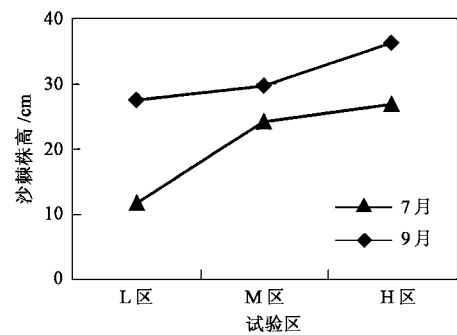


图 5 沙棘的生长状况
Fig.5 Growths of seabuckthorn under different hydraulic loadings

3.3 试验区土壤的变化

经过一个生长季的灌水试验，土壤盐分和重金属测定结果见表 4 和表 5。从表 4 可看出该实验区土壤属非盐化土壤（农用标准规定：半干旱、干旱地区总盐 <1.0g/kg 为非盐化土壤）。虽然灌溉水中含有盐分，但污水灌溉后土壤中盐分没有增加，相反经过 1 个生长季后，高水力负荷区（H）土壤总盐分含量为 0.442 g/kg，比本底降低了 0.083 g/kg。事实上，沙质土壤毛细管效应甚差，在一定强度的降雨或灌水条件下，盐分很难在表层土壤中累积，反而由于淋洗作用而降低。

表 4 土壤盐分测定结果¹⁾/g·kg⁻¹

Table 4 The determination results of salts in experimental sites/g·kg⁻¹

样品名称	总盐	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ + K ⁺
背景土壤	0.525	0.013	0.199	0.022	0.148	0.079	0.016	0.048
H 区土壤	0.442		0.25	0.016	0.073	0.061	0.031	0.011

1) 土壤样品：0~20cm

表 5 是不同地点采集的植物样品中重金属含量的测定结果，2 号贮水塘中的芦苇（*Phragmites australis*）和金鱼藻（*Ceratophyllum demersum*）是水生植物，它们长期生长在污染严重的底泥中。测定结果说明芦苇和金鱼藻的 Pb 和 As 严重超标。Pb 分别为 5.59 mg/kg 和 1.12 mg/kg，As 分别为 1.16

mg/kg 和 2.01 mg/kg。当 2 号贮水塘的废水经过大量水生植物吸收和净化，再经过 4 号塘后，尽管高水力负荷灌水，但草木樨重金属含量 Cd、Pb、Cr 和 As 均低于粮食和蔬菜标准，因此饲用是安全的。实际上所用的 4 号贮水塘的水除重金属镉、铬含量接近或略高于农田灌溉用水标准外，其它重金属污染物远

远低于农田灌溉用水标准(表 3). 电厂废水经过沉淀池和贮水塘的预处理,作为灌溉用水,对于有机质和腐殖质含量极低的风沙土,不容易造成重金属在土壤中累积而影响作物品质.

表 5 试验区植物重金属测定结果/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
Table 5 Heavy metal concentrations in vegetation
in experimental site/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

分析 项目	H 区 草木樨	2 号塘 芦苇	2 号塘 金鱼藻	食品标准 ¹⁾	
				粮食	蔬菜
Cd	0.021	0.043	0.121	≤ 0.2	< 0.05
Pb	< 0.001	5.59	1.12	≤ 0.4	≤ 0.5
Cr	< 0.01	< 0.01	< 0.01	≤ 1.0	≤ 0.2
As	0.043	1.16	2.01	≤ 0.7	≤ 0.5

1) Cd: GB15201-94; As: GB4810-94; Cr: GB14961-94; Pb: GB14935-94

3.4 经济效益分析

电厂废水排放量 $4\,000\text{ m}^3/\text{d}$, 每年排放量 $146\times 10^4\text{ m}^3$, 当地旱田平均灌溉量为 $450\,000\text{ m}^3/(\text{a}\cdot\text{km}^2)$, 去掉各种损失水量后,可灌溉防风固沙的林地 2.67 km^2 , 庇护沙地面积 20.08 km^2 . 以治理 1 km^2 流沙投资 52 500 元计算,可节省沙地治理费用 105 万元^[13].

如果将此水用于灌溉牧草,按照本试验设计的中水力负荷灌水,可保证 0.89 km^2 草木樨生长,以草木樨的鲜重产量 $1\,300\text{ t}/\text{km}^2$ 、干重 $353.85\text{ t}/\text{km}^2$ 计算,共可生产草木樨鲜重 $1\,157\text{ t}$,折合干重 315 t ,可供 862 只阿尔巴斯绒山羊饲喂 1 a,纯经济效益可达 4.56 万元.

废水无害化、资源化利用量 $4\,000\text{ m}^3/\text{d}$,按照 $0.2\text{ 元}/\text{m}^3$,每日效益 800 元,每年利用日 200 d,总效益 16 万元.总之废水在本地区是一种宝贵的资源,如能合理开发利用,在生态建设和发展高效农牧业方面必将发挥重要作用.

4 结论

(1) 电厂废水经预处理后可用于沙地植被恢复灌溉,实验结果证明 3 种不同类型的植物都有明显的增产效果.经过 1 个生长季节, M 区和 H 区新疆杨树冠体积分别为 L 区(对照)的 1.07 倍和 2.21 倍;草木樨的年产量为 L 区的 2.33 倍和 3.0 倍;沙棘株高为 L 区的 1.08 倍和 1.32 倍.3 种植物的生长状况与水力负荷呈明显正相关关系.

(2) 电厂废水预处理系统采用沉淀池和贮水塘的组合,出水可以达到灌溉植物的要求,该预处理系

统容量大,净化功能好,操作简单,经济实用.

(3) 沙质土壤毛细管效应极弱,淋溶下渗作用强,虽然灌溉水中含有较高盐分,但污水灌溉后土壤未形成盐分累积,经过 1 个生长季的灌溉后,高水力负荷区(H) 土壤总盐分由于淋溶作用反而降低了 $0.083\text{ g}/\text{kg}$. 因此,长期灌溉也不会使土壤产生盐渍化问题.

(4) 研究结果表明:高水力负荷区(H) 草木樨中的重金属含量(Cd $0.021\text{ mg}/\text{kg}$ 、Pb $< 0.001\text{ mg}/\text{kg}$ 、Cr $< 0.01\text{ mg}/\text{kg}$ 、As $0.043\text{ mg}/\text{kg}$) 远远低于粮食、蔬菜的食品标准,牧草饲用是安全的.

(5) 废水在本地区是一种宝贵的资源,慢速渗滤土地处理系统(SRTLTS) 在干旱-半干旱地区是实现污水无害化、资源化的有效技术,在生态建设和发展高效农牧业方面可产生重要的经济效益和生态效益.

参考文献:

[1] 孙铁珩,周思毅.城市污水土地处理技术指南[M]. 北京:中国环境科学出版社,1997.1~8.
[2] 高拯民.土壤-植物系统污染生态研究[M]. 北京:中国环境科学出版社,1986.124~141.
[3] Yadav R K, Goyal B, Sharma R K, et al. Post-irrigation impact of domestic sewage effluent on composition of soils, crops and ground water——a case study[J]. Environ Int., 2002, 28(6): 481~486.
[4] 孙铁珩,区自清,李培军.城市污水土地处理系统研究[M]. 北京:科学出版社,1997.
[5] Ramirez Fuentes E, Luchor-constantino C, Escamilla-Silva E, et al. Characteristics, and carbon and nitrogen dynamics in soil irrigated with wastewater for different lengths of time[J]. Bioresour Technol., 2002, 85(2): 179~187.
[6] Meli S, Porto M, Belligno A, et al. Influence of irrigation with lagooned urban wastewater on chemical and microbiological soil parameters in a citrus orchard under Mediterranean condition[J]. Sci Total Environ., 2002, 285(1-3): 69~77.
[7] Herre A, Siebe C, Kaupenjohann M. Effect of irrigation water quality on organic matter, Cd and Cu mobility in soils of Central Mexico[J]. Water Sci. Technol., 2004, 50(2): 277~284.
[8] 李培军,孙铁珩,等.快速渗滤生态工程冬季运行热平衡及其在系统设计中的应用[J]. 应用生态学报,1993, 4(2): 182~186.
[9] 李培军,台培东,靖德兵,等.土地处理技术在干旱-半干旱过渡带生态建设中的应用[J]. 农村生态环境,2003, 19(3): 19~22.
[10] 高拯民,李宪法.城市污水土地处理利用设计手册[M]. 北京:中国标准出版社,1991.
[11] 国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会.水和废水监测分析方法.第三版[M]. 北京:中国环境科学出版社,1989.
[12] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,1999.
[13] 孙铁珩,姜凤歧.草原矿区开发的环境影响与生态工程[M]. 北京:科学出版社,1996.174.