

屠宰场废弃物堆肥对苜蓿生长和碱化土壤肥力指标的影响

刘希凤¹, 张俊华²

(1. 宁夏农垦局, 宁夏农垦集团有限公司, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学新技术应用研究开发中心, 宁夏 银川 750021)

摘要: 对屠宰场猪、牛、羊废弃物堆肥施入退化土壤后作物生理指标、土壤肥力指标和微生物区系变化进行系统研究。结果表明: 施用废弃物堆肥明显提高了苜蓿出苗率, 并缩短了出苗时间, 但不同种类、不同施用量(22.5 t·hm⁻²、30.0 t·hm⁻²和 37.5 t·hm⁻²)废弃物提高的幅度不同。苜蓿鲜生物量随着废弃物施用量的增大而增加, 其中羊废弃物施用量为 37.5 t·hm⁻²的处理最大, 为 11.95 g·plant⁻¹, 不施用废弃物的处理鲜生物量最小, 其最大值为 10.26 g·plant⁻¹; 施用猪废弃物 30.0 t·hm⁻²的处理其干生物量最高(3.91 g·plant⁻¹)。施用屠宰场废弃物堆肥后土壤有机质及养分都有不同程度的增加, 如 10 月中旬土壤有机质和速效钾含量增幅略低, 分别为 9.92% ~ 27.12% 和 5.77% ~ 34.03%, 碱解氮和速效磷增幅分别为 11.79% ~ 47.66% 和 16.92% ~ 44.97%。猪废弃物施用量为 37.5 t·hm⁻²的处理细菌数量在 8 月底达到 3.98 × 10⁷ cfu·g⁻¹, 羊和牛废弃物相同时期相同用量条件下细菌数量相近, 一般废弃物施用量越大土壤中细菌、真菌和放线菌数量也越多。

关键词: 屠宰场废弃物; 堆肥; 施用量; 苜蓿; 生物量; 碱化土壤; 肥力指标; 微生物数量

中图分类号: S141.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)06-0106-06

Effect of slaughterhouse waste composting on growth of alfalfa and fertility index of alkaline soil

LIU Xi-feng¹, ZHANG Jun-hua²

(1. Agriculture Bureau of Ningxia, Yinchuan, Ningxia 750021, China;

2. The Applied Research and Development Center for New Technology of Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Continued growth in meat consumption means that slaughterhouse waste is increasing in amount. Composting is harmless, economic and effective way to dispose of organic solid waste. In this paper, the growth parameters of alfalfa, fertility index and microbial populations of degeneration soil were systematic studied with the application of pig, cattle and sheep slaughterhouse waste. The results showed increased emergence rate and shorten germination duration when compost applied, but it varied with kind of livestock and rate of composts. Fresh biomass of alfalfa increased with the application rate, being highest (11.95 g·plant⁻¹) at 37.5 t·hm⁻² of sheep slaughterhouse waste, and being lowest CK treatment. Slaughterhouse waste increased soil organic matter and nutrients, but the degree varied with soil nutrients. For soil organic matter and available potassium, they were increased by the range were 9.92% ~ 27.12% and 5.77% ~ 34.03%, while for available nitrogen and available phosphorus, they were elevated by a larger range of 11.79% ~ 47.66% and 16.92% ~ 44.97%, respectively. Applied rate 37.5 t·hm⁻² of pig slaughterhouse waste resulted in the largest amount of soil bacteria in August, being 3.98 × 10⁷ cfu·g⁻¹. The results can build a theoretical foundation for utilization of slaughterhouse waste.

Keywords: slaughterhouse waste; composting; applied rate; alfalfa; biomass; alkaline soil; fertility index; microbial biomass

随着社会经济的发展, 人民生活水平逐年提高, 对肉类食品的消费越来越多, 肉类食品消费数量的

持续增长也意味着屠宰场废弃物将不断增加。家畜屠宰场废弃物主要是瘤胃或胃及肠的内容物, 还有

收稿日期: 2014-05-15

基金项目: 国家科技支撑计划(2013BAC02B04)

作者简介: 刘希凤(1972—), 女, 宁夏中卫人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为废弃物资源化利用。E-mail: lx8096@163.com。

通信作者: 张俊华(1977—), 女, 宁夏中卫人, 副研究员, 主要从事土壤质量提升方面的研究。E-mail: zhangjunhua728@163.com。

部分血水、废弃的皮毛、粪便、下角料等,这些物质都富含养分。但是屠宰场废弃物含有大肠菌、链球菌,极易遭受微生物的污染,除此之外一些导致人畜共同传染病(Zoonoses)的微生物,如 *Campylobacter*、*Salmonella* 以及 *Yersinia*, 会危害人类健康^[1]。堆肥化是有机固体废弃物无害化、资源化的根本途径^[2-4]。顾兵等^[5]选择绿化植物废弃物堆肥能提高土壤持水能力、降低土壤酸碱度,增加土壤有机质和养分及微生物总量。陈金海等^[6]研究发现互花米草与羊粪混合堆肥还田能降低土壤容重和含盐量,土壤有机碳、TN、TP、蔗糖酶活性显著提高。不同外源有机物质堆肥均可使土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量快速下降,而 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量迅速增加,土壤氮矿化量显著增加,改善土壤供氮能力,改善土壤的细菌群落结构,但效果不同^[7-10]。Wortmann and Shapiro 则指出施用堆肥可以增强土壤团聚体稳定性,减少土壤侵蚀,降低土壤磷素流失风险^[11]。但这些研究大多都是针对畜禽粪便、秸秆等有机固体废弃物堆肥施入土壤后对土壤理化性状及微生物动态变化^[12-13]。

添加微生物菌剂后,屠宰场废弃物高温堆肥约 30 d,达到腐熟要求^[14-16]。但腐熟后的废弃物堆肥施入土壤后对土壤理化性状和微生物区系变化的研究报道较少。本研究以屠宰场不同家畜废弃物为研究对象,经过堆肥处理后施入土壤,研究一个生长季后不同处理土壤理化性状和微生物区系的变化,探讨不同种类屠宰场废弃物作为有机肥施入土壤后土壤肥力变化的异同点,为屠宰场废弃物资源化利用提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

废弃物:取自宁夏银川市生猪定点屠宰场和宁夏永宁县王团村清真屠宰场。

1.2 试验设计

试验地点:贺兰山农牧场。该试验地为 2011 年新垦荒地,2012 年为种植作物第二年。土壤肥力低下,土壤基本理化性状如表 1 所示。

表 1 试验地土壤基本理化性状

Table 1 Soil properties of the experimental field

pH	碱化度 ESP /%	全盐 Total salinity /(g·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter /(g·kg ⁻¹)	全氮 Total N /(g·kg ⁻¹)	碱解氮 Avail. N /(mg·kg ⁻¹)	速效磷 Avail. P /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Avail. K /(mg·kg ⁻¹)
9.76	46.22	1.94	5.26	0.38	27.83	5.32	130.35

试验处理:处理 1 - 猪废弃物 22.5 t·hm⁻²;处理 2 - 猪废弃物 30.0 t·hm⁻²;处理 3 - 猪废弃 37.5 t·hm⁻²;处理 4 - 牛废弃物 22.5 t·hm⁻²;处理 5 - 牛废弃物 30.0 t·hm⁻²;处理 6 - 牛废弃物 37.5 t·hm⁻²;处理 7 - 羊废弃物 22.5 t·hm⁻²;处理 8 - 羊废弃物 30.0 t·hm⁻²;处理 9 - 羊废弃物 37.5 t·hm⁻²;处理 10 - 不施用任何有机废弃物。共 10 个处理,每个处理重复 3 次,共 30 个小区,随机区组排列。每个小区面积为 40 m²(4 m × 10 m),田埂宽 0.5 m,水渠宽 1 m,四周保护行宽 2 m。首先将废弃物和化肥基肥撒施到土表人工翻耕,继而灌水,然后再翻耕一次。试验地尿素、过磷酸钙和硫酸钾的施用量分别为 330、630 kg·hm⁻²和 90 kg·hm⁻²,化肥 70% 作为底肥基施,30% 中期灌水时追施。种植作物为紫花苜蓿,于 2012 年 5 月 6 日播种,播种量 15 kg·hm⁻²,品种为金黄后。

该试验 3 种屠宰场废弃物均堆肥 1 个月,根据前期最适宜微生物菌剂试验结果,猪废弃物堆肥添加北京煜宏鹰科技有限公司生产的复合微生物菌

剂,牛、羊废弃物分别添加山东德州阳光生物科技有限公司生产的微生物菌剂,同时堆体还加入适量锯末调节堆体 C/N。堆肥堆好后用黑色遮阳网或比较透气的覆盖物遮盖,堆肥 10 d 取少量样品测定堆体水分含量,若低于 50%,则加水增加含水量至 50%~60%。2012 年 7 月 27 日第一次人工收割,9 月 25 日第二次人工收割。

1.3 土壤样品测定指标及方法

土壤 pH 值用酸度计法(梅特勒 - 托利多 Delta320,土:水 = 1:5),碱化度用计算法,全盐用质量法,有机质用重铬酸钾容量法-外加热法,碱解氮用碱解扩散法,速效磷用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 法即 Oslen 法,速效钾采用乙酸铵提取用火焰光度计法^[17]。微生物生物量采用稀释平板培养计数法(细菌、放线菌、真菌计数所用培养基分别为牛肉膏 - 蛋白胨培养基、高氏 1 号培养基、PDA 培养基)^[18]。

2 结果与分析

2.1 对苜蓿出苗率和株高的影响

该试验 2012 年 5 月 6 日播种,5 月 17 左右开始

出苗,5月27日统计出苗率。由图1可以看出,施用废弃物的处理苜蓿出苗率均高于对照,但不同种类的废弃物提高幅度不同,相同废弃物不同施用量条件下苜蓿的出苗率也不同,而且并非施用量越大出苗率越高。猪废弃物施用量为 $30.0\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的处理苜蓿出苗率在其三个施用量中最高,分别较施用量 $22.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $37.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理和对照提高 6.58% 、 2.53% 和 19.11% 。牛废弃物则是施用量越大苜蓿出苗率越高,施用量为 $37.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的处理出苗率比施用量 $22.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $30.0\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和对照分别提高 11.25% 、 8.54% 和 30.88% 。羊废弃物也是施用量越大出苗率越高,但施用量 $22.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $37.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理出苗率略低于同量的牛废弃物。一般来讲,在施用量合理范围内施用量越大对作物的生长促进作用越明显,但猪废弃物施用量为 $37.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的处理出苗率低于 $30.0\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的处理,可能与猪废弃物中含有猪毛有关,猪毛不易腐解,经过1个月的堆肥后形态也无变化,过多的猪毛影响了作物种子的发芽和出苗(屠宰生猪时屠宰场为了方便将机器未脱干净的猪毛人工拔除后一同混入废弃物

中)。施用了屠宰场废弃物堆肥的处理种子出苗较对照早了2d左右。所以,在退化土壤上施用屠宰场废弃物可以减轻盐碱胁迫或肥力不足对苜蓿种子的毒害和阻碍作用,明显提高了苜蓿出苗率,并缩短了出苗时间。

植物株高是评价植物生长状况的重要指标。于不同时期:6月18日(苗期)、7月10日(生长旺盛期)、8月29日(第一次刈割后约一个月)和10月15日(第二次刈割后20d)进行了苜蓿株高和生物量的测定(图1)。6月18日整块试验地长势差,由于播种后一直没有灌水,降雨量少,苜蓿生长环境干旱,所以所有处理长势都不理想。但株高和地上生物量还有一定的差异,不施用任何屠宰场废弃物的处理株高和地上生物量都最低,施用废弃物的处理施用量越大苜蓿株高和地上生物量也越大,但施与不施废弃物、施用不同量的废弃物间差异都不显著。6月23日灌水,紧接着又有两次明显的降水,经过近20d,苜蓿长势良好,处理间株高和地上生物量仍无明显差异,但整体来讲对照处理的株高和地上生物量都最低。

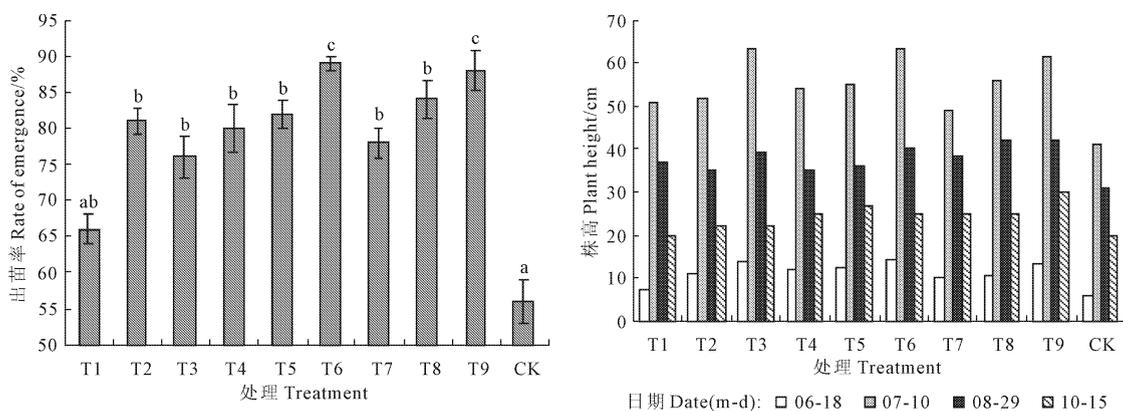


图1 不同处理条件下苜蓿的出苗率和株高

Fig.1 Germination rate and plant height of alfalfa for different treatments

2.2 对苜蓿生物量的影响

植物地上生物量也是评价植物生长状况和土地生产力的重要指标。6月18日、7月10日、8月29日和10月15日进行了苜蓿鲜生物量和干生物量的测定(图2)。7月28日人工收割后继续生长,于一个月后(8月29日)进行了生物量的测定。测定结果表明,鲜生物量随着废弃物施用量的增大而增加,其中羊废弃物施用量为 $30.0\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的处理最高,不施用废弃物的处理鲜生物量最小;干生物量中施用猪废弃物 $30.0\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的处理最高,对照处理最低。不同处理间8月29日的干生物量的差异小于10月15日的干生物量,而且相同处理干、鲜生物量的差

异也明显减小,说明越到后期苜蓿的干生物量越大。

2.3 对土壤理化性状的影响

不同种类有机肥对土壤有机质的影响也不同,但均表现为对耕层土壤有机质及养分含量增加有促进^[19]。试验地土壤属于中度碱化土壤,土壤有机质和碱解氮、速效磷含量都非常低,但速效钾含量为中等水平。施用屠宰场废弃物后土壤有机质及养分都有不同程度的增加(表2),随着施用量的增大增幅逐渐加大,但相对来讲土壤有机质和速效钾含量增幅略低,碱解氮和速效磷增幅较大,这是因为有机质的积累是一个缓慢的过程,但由于土壤本底有机质含量非常低($5.26\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),所以到10月15日采样

2.4 对土壤微生物数量的影响

试验地土壤微生物中细菌的数量最多 ($\times 10^7$ cfu·g⁻¹), 放线菌居中 ($\times 10^5$ cfu·g⁻¹), 真菌最少 ($\times 10^3$ cfu·g⁻¹)。不同种类不同施用量的废弃物对土壤细菌数量的影响不同, 在 6 月 18 日各处理的细菌数量较对照有小幅增加(表 3), 7 月 10 日则较对照有大幅度增大, 8 月底增幅更大, 10 月中旬则下降到 7 月上旬的水平。这是由于屠宰场废弃物堆肥作为有机肥施入土壤后刺激了微生物的生长和活动, 微生物数量不同程度地高于对照, 与陶磊等^[21]试验结果一致。各废弃物施用量越大细菌含量越多, 其

中猪废弃物施用量最大的处理细菌数量在 8 月底最多, 羊和牛废弃物相同时期相同用量条件下细菌数量相近。放线菌数量在不同测定时期变化规律与细菌不同, 四个时期中前两个时期放线菌变化不大, 8 月底和 10 月中旬又逐渐增大。真菌数量变化与细菌和放线菌都不同: 7 月份真菌含量均小于 6 月份, 8 月底则较 7 月份有较大幅度增加, 且整体高于 6 月份含量, 而到 10 月中旬又普遍降低。由于总菌数是三种微生物数量的加和, 细菌数量又占绝对优势, 所以总菌数的变化规律同细菌一样。试验结果表明一般废弃物施用量越大土壤中各微生物数量也越大。

表 3 不同处理微生物数量变化

Table 3 The amount of microbial for different treatments

微生物 Microbial	处理 Treatment	06-18	07-10	08-29	10-15	微生物 Microbial	06-18	07-10	08-29	10-15
细菌 Bacterium ($\times 10^7$ cfu·g ⁻¹)	T1	1.34	1.48	2.25	1.82		1.65	1.15	2.46	2.49
	T2	1.26	2.16	2.90	2.04		1.59	1.94	2.19	2.67
	T3	1.40	2.54	3.98	1.95		1.85	1.46	2.41	2.82
	T4	1.50	1.94	3.19	2.47	放线菌	1.67	1.95	1.95	2.84
	T5	1.62	2.51	2.88	1.65	Actino- mycete	1.84	1.52	2.16	2.49
	T6	1.65	2.62	3.51	1.32	($\times 10^5$ cfu·g ⁻¹)	1.80	1.60	2.12	2.80
	T7	1.53	1.91	2.53	1.26		1.90	1.81	2.45	2.75
	T8	1.68	2.41	2.61	2.03		1.94	2.16	2.68	3.06
	T9	1.59	2.55	3.46	2.54		1.87	1.68	2.99	3.09
	CK	1.30	1.44	1.86	1.27		1.61	1.03	1.34	2.04
真菌 Fungi ($\times 10^3$ cfu·g ⁻¹)	T1	0.94	0.89	0.64	1.05		13565.94	14915.89	18446.64	42750.05
	T2	0.98	0.74	1.80	1.16		12759.98	21794.74	20620.80	30068.16
	T3	0.94	0.75	2.16	1.05		14185.94	22546.75	19743.16	34883.05
	T4	1.01	0.86	1.35	1.07	总菌数	15168.01	19595.86	24896.35	39185.07
	T5	0.92	0.82	1.46	1.06	Microbial	16384.92	25252.82	16717.46	29050.06
	T6	1.01	0.78	1.51	1.16	($\times 10^3$ cfu·g ⁻¹)	16681.01	26360.78	13413.51	35381.16
	T7	0.92	0.71	2.15	1.24		15490.92	19281.71	12847.15	25576.24
	T8	0.95	0.75	2.33	1.15		16994.95	24316.75	30570.33	26407.15
	T9	0.99	0.80	2.68	1.17		16087.99	25668.80	25601.68	40110.17
	CK	0.92	0.72	1.53	1.10		13161.92	14503.72	12835.53	18805.10

3 结 论

1) 施用屠宰场废弃物堆肥提高了苜蓿出苗率、株高和地上生物量。地上部分生物量随着废弃物施用量的增大而增加, 其中羊废弃物施用量 30.0 t·hm⁻²的处理鲜生物量最高, 而施用量为 30.0 t·hm⁻²的猪废弃物处理干生物量最高, 对照处理最低。

2) 土壤有机质和养分含量的增幅并不是随施用量的增加幅度而增加, 而是达到一个高度后增幅减缓。施用牛废弃物 30.0 t·hm⁻²的处理有机质增量最大, 施用羊废弃物 37.5 t·hm⁻²的处理速效钾含

量最高, 施用猪废弃物的处理土壤有机质和养分的增量相对较小。

3) 各废弃物施用量越大细菌含量越多, 其中猪废弃物施用量最大的处理细菌数量在 8 月底最多, 羊和牛废弃物相同时期相同用量条件下细菌数量相近。各处理放线菌数量在前两个时期变化不大, 8 月底到 10 月中旬又逐渐增大。真菌数量先减小后增大, 到 10 月中旬又普遍减小。

参 考 文 献:

[1] Fransen N G, Elzen A M, Uurlings B A, et al. Pathogenic micro-or-

- ganisms in slaughterhouse sludge-a survey[J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 1996, 33(2-3):245-256.
- [2] György F, Szilveszter B. Composting to recycle biowaste[M]. Sustainable Agriculture Reviews, 2010, (3):319-346.
- [3] Lu Dui'an, Yan Baixing, Wang Lixia, et al. Changes in phosphorus fractions and nitrogen forms during composting of pig manure with rice straw[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(10):1855-1864.
- [4] Wang X, Selvam A, Chm M, et al. Nitrogen conservation and acidity control during food wastes composting through struvite formation[J]. Bioresource Technology, 2013, 147:17-22.
- [5] 顾兵, 吕子文, 方海兰, 等. 绿化植物废弃物堆肥对城市绿地土壤的改良效果[J]. 土壤, 2009, 41(6):940-946.
- [6] 陈金海, 王红丽, 王磊, 等. 互花米草/羊粪混合堆肥还田对滨海盐碱土壤的改良效应: 实验室研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(3):513-521.
- [7] 张旭, 席北斗, 赵越, 等. 有机废弃物堆肥培肥土壤的氮矿化特性研究[J]. 环境科学, 2013, 34(6):2448-2455.
- [8] 罗佳, 蒋小芳, 孟琳, 等. 不同堆肥原料的有机无机复合肥对油菜生长及土壤供氮特性的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(1):97-106.
- [9] 蒋小芳, 罗佳, 黄启为, 等. 不同原料堆肥的有机无机复混肥对辣椒产量和土壤生物性状的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(4):766-773.
- [10] Zaller J G, Köpke U. Effects of traditional and biodynamic farmyard manure amendment on yields, soil chemical, biochemical and biological properties in a long-term field experiment[J]. Biology and Fertility of Soils, 2004, 40(4):222-229.
- [11] Wortmann C S, Shmpro C A. The effects of manure application on soil aggregation[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2008, 80(2):173-180.
- [12] Kopic N, Domanovac M V, Kucic D, et al. Evaluation of laboratory-scale in-vessel co-composting of tobacco and apple waste[J]. Waste Management, 2014, 34(2):323-328.
- [13] Zhou Haibin, Ma Chuang, Gao Ding, et al. Application of a recyclable plastic bulking agent for sewage sludge composting[J]. Biore-source Technology, 2014, 152(6):329-336.
- [14] 张俊华, 刘希凤, 毕江涛, 等. 屠宰场羊废弃物堆肥基本性质及微生物区系变化[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(1):152-156.
- [15] 张俊华, 刘希凤, 毕江涛, 等. 不同处理条件下生猪屠宰场废弃物堆肥基本性质及微生物区系变化研究[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(2):100-105.
- [16] 张俊华, 刘希凤, 毕江涛, 等. 肉牛屠宰场废弃物堆肥基本性质及微生物区系变化研究[J]. 土壤通报, 2013, 44(3):703-708.
- [17] 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.
- [18] 中国科学院南京土壤研究所微生物室. 土壤微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [19] 龚伟, 颜晓元, 王景燕. 长期施肥对土壤肥力的影响[J]. 土壤, 2011, 43(3):336-342.
- [20] 钦绳武, 顾益初, 朱兆良. 潮土肥力演变与施肥作用的长期定位试验初报[J]. 土壤学报, 1998, 35(3):367-375.
- [21] 陶磊, 褚贵新, 刘涛, 等. 有机肥替代部分化肥对长期连作棉田产量、土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(21):6137-6146.

(上接第42页)

参考文献:

- [1] 阳园燕, 郭安红, 安顺清, 等. 土壤-植物-大气连续体(SPAC)系统中植物根系吸水模型研究进展[J]. 气象科学, 2004, 32(5):316-321.
- [2] 王沙生, 高荣孚, 吴贯明. 植物生理学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1991, 192.
- [3] 解婷婷, 张希明, 梁少民, 等. 不同灌溉量对塔克拉玛干沙漠腹地梭梭水分生理特性的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(4):711-716.
- [4] 郑睿, 康绍忠, 佟玲, 等. 不同天气条件下荒漠绿洲区酿酒葡萄植株耗水规律[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20):99-106.
- [5] 闫业庆, 胡雅杰, 张旭, 等. 不同天气条件下玉米生长期茎流变化特性及研究[J]. 中国农村水利水电, 2011, (10):1-6.
- [6] 赵自国, 夏江宝, 王荣荣, 等. 不同土壤水分条件下叶底珠(*Securinega suffruticosa*)茎流特征[J]. 中国沙漠, 2013, 33(5):1385-1389.
- [7] 段爱旺. 一种可以直接测定蒸腾速率的仪器-茎流计[J]. 灌溉排水, 1996, 3(14):44-47.
- [8] 罗中岭. 热量法茎流测定技术的发展及应用[J]. 中国农业气象, 1997, 18(3):52-57.
- [9] 刘奉觉, 郑世错, 巨关升, 等. 树木蒸腾耗水测量技术的比较研究[J]. 林业科学, 1997, 33(2):119-125.
- [10] 丁筱玲, 赵立新, 张业民. 植物茎液流速及蒸腾量动态测试仪[J]. 农业工程学报, 2000, 16(3):46-49.
- [11] 马李一, 孙鹏森, 马履一. 油松、刺槐单木与林分水平耗水量的尺度转换[J]. 北京林业大学学报, 2001, 23(4):1-5.
- [12] 马兴祥, 魏育国, 蒋菊芳. 沙漠边缘新垦酿造葡萄园土壤贮水及作物耗水特性研究[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(4):58-61.
- [13] 岳广阳, 张铜会, 赵哈林, 等. 科尔沁沙地黄柳和小叶锦鸡儿茎流及蒸腾特征[J]. 生态学报, 2006, 26(10):3205-3213.
- [14] 刘德林, 刘贤超. GREENSPAN茎流法对玉米蒸腾规律的研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(2):134-137.
- [15] 李宗美, 段金省, 黄斌, 等. 气候变化对陇东塬区农作物生长发育的影响与对策研究[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(2):219-224.
- [16] 苏培玺, 解婷婷, 丁松爽. 荒漠绿洲区临泽小枣及枣农复合系统需水规律研究[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(2):334-341.