

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.020

# 基于主成分分析的不同预处理麦秸改良土壤效果评价

王增丽<sup>1</sup> 冯浩<sup>2</sup> 余坤<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 以7种不同预处理(T1~T7)麦秸改良土壤为试验数据, 选用150 min累积入渗量( $I_{150}$ )、有效含水率( $\theta$ )、土壤累积蒸发量( $E_c$ )、土壤团聚体分形维数( $F_D$ )、土壤孔隙分形维数( $D_p$ )、秸秆分解率( $R_d$ )、全氮含量( $w_{TN}$ ) 7个相互独立的指标, 基于主成分分析方法研究不同预处理秸秆还田后, 对土壤入渗特性、土壤水分有效性、持水性、结构稳定性、土壤孔隙、秸秆分解率、土壤全氮含量7个方面的改良土壤效果进行评价。将各评价指标的加权和作为改良土壤效果的综合主成分指标。结果表明, 改良效果综合主成分可以代表86.93%的不同预处理麦秸改良效果变异信息, 且服从正态分布, 具有较好的代表性和客观性, 可以用于预处理麦秸改良土壤效果的评价。在7个指标中, 第一公因子以全氮含量( $w_{TN}$ )、孔隙分形维数( $D_p$ )、土壤团聚体分形维数( $F_D$ )、土壤有效含水率( $\theta$ )的贡献率较大(达49.92%); 第二公因子以秸秆分解率( $R_d$ )、累积入渗量( $I_{150}$ )和土壤累积蒸发量( $E_c$ )的贡献率较大(达37.01%)。不同预处理秸秆改良土壤综合效果优劣依次为T6、T7、T3、T5、T4、T2、T1。氨化秸秆对土壤的综合改良效果优于未氨化秸秆, 粉碎秸秆对土壤的综合改良效果优于未粉碎秸秆, 氨化秸秆与硫酸钙改良剂混合还田的土壤改良效果优于与硫酸铝改良剂混合配施措施。

**关键词:** 麦秸; 预处理; 改良土壤; 主成分分析; 效果评价

**中图分类号:** S275.3   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1000-1298(2016)10-0150-06

## Effect Evaluation of Different Pretreated Wheat Straw Utilizations on Soil Improvement Based on Principal Component Analysis

Wang Zengli<sup>1</sup> Feng Hao<sup>2</sup> Yu Kun<sup>1</sup>

(1. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Region of China, Northwest A&amp;F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** In order to find optimal pretreated wheat straw utilization on soil improvement, soil samples were collected from indoor incubation experiment of different wheat straw utilizations, seven separate indicators, including 150 min of cumulative infiltration ( $I_{150}$ ), available soil water content ( $\theta$ ), cumulative evaporation ( $E_c$ ), soil aggregate fractal dimension ( $F_D$ ), soil pore fractal dimension ( $D_p$ ), straw decomposition rate ( $R_d$ ) and total nitrogen ( $w_{TN}$ ), were chosen to evaluate the effect of different pretreated wheat straw utilizations on soil improvement (e.g., water infiltration capacity, soil moisture availability, water-holding capacity, structural stability, soil porosity, straw decomposition rate and soil total nitrogen content). The principle component analysis method was used to conduct the above mentioned seven indicators, then comprehensive improvement index of soil improvement of wheat straw utilization was established by weighted sum of different evaluation indices. Result showed that comprehensive improvement quality principle component obeyed normal distribution significantly and had good representation and objectivity, which could include 86.93% primordial quality attribute variation

收稿日期: 2016-03-18 修回日期: 2016-04-25

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2011AA100503)、甘肃省陇原青年创新人才扶持计划项目(2015090)、中央高校基本科研业务费专项资金项目和高等学校学科创新引智计划(111计划)项目(111-2-16)

**作者简介:** 王增丽(1974—),女,高级工程师,博士,主要从事农业水土资源利用与保护研究, E-mail: wangzengli201@163.com

**通信作者:** 冯浩(1970—),男,研究员,主要从事农业水土资源高效利用研究, E-mail: nerewsi@vip.sina.com

information, so it could be used as the overall pretreated wheat straw utilization improvement evaluation index of the seven indicators,  $w_{TN}$ ,  $D_p$ ,  $F_D$  and  $\theta$  contributed the largest percentage (49.92%) in the first common factor, while  $R_d$ ,  $I_{150}$  and  $E_c$  contributed the most (37.01%) in the second common factor. The treatments order of wheat straw utilization improvement was T6 > T7 > T3 > T5 > T4 > T2 > T1. Comprehensive soil amendment of ammoniated straw was better than that of non-ammoniated straw, comprehensive soil amendment of pulverized straw was better than that of non-pulverized straw, ammoniated straw mixed with calcium sulphate improver was better than that of mixed with aluminum sulfate improver.

**Key words:** wheat straw; pretreated; soil improvement; principle component analysis; effect evaluation

## 引言

大量研究表明,向土壤中添加有机物料能显著改善土壤结构,增加土壤有机质含量<sup>[1-5]</sup>。但土壤结构的改善不仅与输入有机物总量有关,还与秸秆的有机物组成和特征有关<sup>[6]</sup>。禾本科作物秸秆改良土壤效果受施入方式及深度、粉碎程度、C/N 等因素影响<sup>[6-9]</sup>,若秸秆进行直接还田存在秸秆分解缓慢、易诱发病虫害、影响农机旋耕作业效率及下季作物生长等一些负面效应<sup>[10-11]</sup>。

无机土壤改良剂中富含  $Ca^{2+}$ 、 $Al^{3+}$  和  $Fe^{3+}$  等高价金属离子,这些高价离子可促进土壤黏粒与有机质结合,促进土壤形成团聚体、提高土壤结构的稳定性<sup>[12]</sup>。有研究表明,工业固体废弃物(脱硫石膏)与有机物质混合配施后施入土壤能降低土壤容重和盐分含量,可培肥地力,提高作物产量,还具有显著的减障增效作用<sup>[13-15]</sup>。

尽管国内外有关秸秆还田对土壤改良效果的研究较多,但大都集中在改良方法、改良措施、改良后作物产量<sup>[16-18]</sup>的变化等方面,一般只对各指标单独分析,而借助统计学综合分析方法对不同秸秆还田方式的土壤改良综合效应研究较少。本文对麦秸进行粉碎、氨化预处理,并选取无机土壤改良剂(硫酸钙、硫酸铝)进行混合配施,通过室内培养试验,利用主成分分析和因子分析方法,研究不同预处理秸秆还田后土壤理化性状的变化,以期通过系统的统计学分析方法,阐明不同处理秸秆还田的土壤改良效果,为秸秆还田的土壤改良提供理论依据。

## 1 不同预处理秸秆还田改良土壤效果试验

试验在西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院综合试验室进行,供试土壤为试验基地耕作层土壤,土壤质地为粉壤土,风干后过 2 mm 筛备用。供试秸秆为上季小麦秸秆,粉碎至粉末状(1 mm)和 20 mm 两个水平备用,秸秆 C/N 值为 94.73。供试无机土壤改良剂为硫酸钙、硫酸铝试剂,纯度均为

99%,呈粉末状。

本试验秸秆氨化方法参考毛华明方法<sup>[19]</sup>,以水溶液形式向秸秆中加入占其干质量 1.33% 的尿素(调节秸秆 C/N 值为 25)及 4% 的氢氧化钙(过量),溶液总质量为秸秆质量的 30%,以喷洒方式与秸秆混合均匀后装入密闭塑料容器,放入人工气候箱中在温度为 40℃ 条件下培养 7 d 后取出进行试验。

试验共设 7 个处理,如表 1 所示。各处理中秸秆质量占总质量的 0.5%,硫酸钙、硫酸铝质量分别占总质量的 0.1%。其中 T3、T4、T5、T6、T7 处理,硫酸钙、硫酸铝分别与秸秆混合后再与土壤均匀混合。各处理土样按容重 1.30 g/cm<sup>3</sup> 分层(每层 5 cm)填装到内径 10.5 cm、高 35 cm 与内径 10.5 cm、高 12 cm 的大、小 2 种 PVC 管中,管底用纱布封闭,其中大 PVC 管填装高度为 30 cm,小 PVC 管填装高度为 10 cm。

表 1 试验处理设置

Tab. 1 Different treatments of experiment

处理	处理内容
T1	长秸秆处理
T2	粉碎秸秆处理
T3	粉碎秸秆 + 硫酸钙处理
T4	粉碎秸秆 + 硫酸铝处理
T5	粉碎氨化秸秆处理
T6	粉碎氨化秸秆 + 硫酸钙处理
T7	粉碎氨化秸秆 + 硫酸铝处理

各处理大 PVC 土柱进行入渗试验后在水中作饱和处理,取出静置 48 h(消除重力水),放入人工气候箱中在恒定环境(温度 35℃,相对湿度 70%)下分别培养至 8 周、16 周、24 周。各处理大、小 PVC 土柱分别设置 6、9 个重复,共 105 个土柱。

具体测定项目如下:

采用垂直一维积水入渗法测定各处理 150 min 内土壤累积入渗量( $I_{150}$ )。

由于土壤所吸持水分并非在某一吸力段全部释放供植物吸收利用,而是随着吸力增大逐渐释放。

一般认为,大于 1 500 kPa 的土壤水分对作物无效。因此本研究将培养至既定时间的各处理取 3 个小土柱,采用离心法测定各处理在 10 kPa、1 500 kPa 时的土壤体积含水率,并计算各处理土壤有效含水率

$$\theta = \theta_{10} - \theta_{1500} \quad (1)$$

式中  $\theta$ ——各处理有效含水率, %

$\theta_{10}$ ——各处理在 10 kPa 时的土壤含水率, %

$\theta_{1500}$ ——各处理在 1 500 kPa 时土壤含水率, %

在各培养时段内,大土柱采用逐日称量法进行土壤累积蒸发量( $E_c$ )测定,测定周期为 17 d。

土壤团聚体分形维数可反映团聚体含量对土壤结构稳定性的影响趋势,其值越小,结构稳定性越好,反之则越差。采用湿筛法测定各处理大于 3 mm、2 ~ 3 mm、1 ~ 2 mm、0.5 ~ 1 mm、0.25 ~ 0.5 mm、小于 0.25 mm 的各粒级水稳性团聚体含量,并计算土壤团聚体分形维数为

$$F_D = 3 - \frac{\lg(w_i/w_0)}{\lg(d_i/d_{\max})} \quad (2)$$

式中  $F_D$ ——土壤团聚体分形维数

$w_i$ ——直径小于  $d_i$  的累积质量, g

$w_0$ ——土样总质量, g

$\bar{d}_i$ ——两相邻粒级  $d_i$  与  $d_{i+1}$  间土粒平均直径, mm

$\bar{d}_{\max}$ ——最大粒级土粒平均直径, mm

孔隙分维反映了土壤孔隙的均匀性和连通性,其值越大,说明孔隙越均匀且连通性越好。孔隙分形维数( $D_p$ )为

$$\frac{\theta_b}{\theta_s} = \left( \frac{\Psi}{\Psi_a} \right)^{D_p-3} \quad (3)$$

式中  $D_p$ ——孔隙分形维数

$\theta_b$ ——某一吸力下,土壤对应含水率, %

$\theta_s$ ——饱和含水率, %

$\Psi$ ——介质的基质吸力, kPa

$\Psi_a$ ——进气吸力, kPa

采用重铬酸钾容量-外加热法测定土壤 TOC 含量,并计算秸秆分解率

$$R_d = [1 - (C_i - C_1)/C] \times 100\% \quad (4)$$

式中  $R_d$ ——秸秆分解率, %

$C_i$ ——培养  $i$  段时间后土样中的 TOC 含量, g

$C_1$ ——对照土壤经一定时间分解后的 TOC 含量, g

$C$ ——加入的秸秆的 TOC 含量, g

采用凯氏定氮法(KJELTE2300型全自动定氮仪,瑞典)测定既定培养期结束后土壤中的全氮含量( $w_{TN}$ )。

## 2 改良效果评价指标与评价方法

主成分分析是指将原始的多个变量,通过线性组合,提炼出较少几个彼此独立的新变量的一种多元统计分析方法,它将原来的多个指标组合成相互独立的少数几个能充分反映总体信息的指标<sup>[20]</sup>。

本文拟对各处理土壤入渗特性、土壤水分有效性、持水性、结构稳定性、土壤孔隙、秸秆分解率、土壤全氮含量 7 个方面的改良土壤效果进行评价。分别选用了累积入渗量( $I_{150}$ )、有效含水率( $\theta$ )、土壤累积蒸发量( $E_c$ )、土壤团聚体分形维数( $F_D$ )、土壤孔隙分形维数( $D_p$ )、秸秆分解率( $R_d$ )、土壤全氮含量( $w_{TN}$ ) 7 个具有代表性且相互独立的指标,指标部分为正向指标,如累积入渗量、有效含水率、土壤孔隙分形维数、秸秆分解率、土壤全氮含量,其数值越大表明改良效果越高;部分为负向指标,如累积蒸发量、土壤团聚体分形维数,其数值越小表明改良效果越好。因此,为保证评价指标优劣方向的一致,在评价之前,对低劣指标进行同趋化处理(即在低劣指标前加负号)后再进行标准化,最后计算标准化评价指标。

为达到获取主要信息并减少指标数量的目的,本研究选择累积方差贡献率达到 85% 的少数  $m$  ( $m < p$ ) 个主成分作为主要主成分进行综合评价。

改良效果综合主成分、改良效果度量参照文献[21]计算,即

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m w_j (f_{ij} - f_j^+)^2} \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (5)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m w_j (f_{ij} - f_j^-)^2} \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (6)$$

$$Q_i^{**} = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (7)$$

式中  $d_i^+$ 、 $d_i^-$ ——最大主成分向量和最小主成分向量

$w_j$ ——第  $j$  个主要主成分的方差贡献率

$f_j^+$ 、 $f_j^-$ —— $n$  个评价对象中第  $j$  个主要主成分的最大值、最小值

$Q_i^{**}$ ——综合改良效果度量,其值越接近于 1,表明改良效果越好

## 3 结果与分析

### 3.1 改良效果指标同趋化与相关矩阵

以不同预处理麦秸还田土壤改良效果作为评价对象,各个指标进行标准化处理后评价指标统计量、样本相关系数矩阵如表 2、3 所示。

表 2 改良效果评价指标统计

Tab. 2 Statistics of evaluation indexes for irrigation performance

评价指标	统计量				
	处理数	平均值	最大值	最小值	标准差
$I_{150}/\text{mm}$	7	134.31	141.43	123.29	5.854
$\theta/\%$	7	19.26	19.62	18.53	0.373
$E_c/\text{mm}$	7	77.06	78.20	76.06	0.730
$F_D$	7	2.92	2.94	2.89	0.017
$D_p$	7	2.85	2.86	2.85	0.004
$R_d/\%$	7	13.55	18.01	9.90	3.610
$w_{\text{TN}}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	7	0.45	0.48	0.43	0.015

### 3.2 特征值、特征向量与改良效果综合主成分

利用 SPSS 软件对相关系数矩阵进行了主成分分析, 所得特征值和特征向量如表 4 所示。结果表明, 前 2 个主成分的累积方差贡献率为 86.93%, 包含了原始数据的大部分变异信息, 选择前 2 个主成

分作为主要主成分, 可以起到降低变量个数且保留大部分原始信息的目的。其中, 第 1 分量  $f_1$  综合反映了原始变异信息的 49.92%, 主要包括全氮含量 ( $w_{\text{TN}}$ )、孔隙分形维数 ( $D_p$ )、土壤团聚体分形维数 ( $F_D$ )、土壤有效含水量 ( $\theta$ ) 4 个指标的变异信息, 第 2 分量  $f_2$  综合反映了原始变异信息的 37.01%, 变异信息包括秸秆分解率 ( $R_d$ )、累积入渗量 ( $I_{150}$ ) 和土壤累积蒸发量 ( $E_c$ ) 3 个指标的变异信息。

不同预处理麦秸还田土壤改良综合主成分计算结果(表 5)表明各处理的改良综合效果优劣依次为 T6、T7、T3、T5、T4、T2、T1。结果表明, 秸秆进行氨化处理对改良土壤综合效果影响较大, 且秸秆与无机土壤改良剂(硫酸钙、硫酸铝)混合配施改良土壤综合效果较优; 粉碎秸秆与无机土壤改良剂(硫酸钙、硫酸铝)混合配施也较单施粉碎秸秆、长秸秆处理改良土壤综合效果更优。

表 3 秸秆还田改良土壤效果评价指标相关系数矩阵

Tab. 3 Correlation coefficient matrix of evaluation indexes for soil improvement of straw-returning

	$I_{150}$	$\theta$	$E_c$	$F_D$	$D_p$	$R_d$	$w_{\text{TN}}$
$I_{150}$	1						
$\theta$	0.691	1					
$E_c$	-0.776*	-0.296	1				
$F_D$	0.139	-0.457	-0.342	1			
$D_p$	-0.620	-0.856**	0.392	0.594	1		
$R_d$	0.680	0.350	-0.507	0.661	-0.024	1	
$w_{\text{TN}}$	-0.366	-0.615	0.145	0.762*	0.742*	0.284	1

注: \* 表示行变量和列变量之间达显著相关水平 ( $p < 0.05$ ); \*\* 表示行变量和列变量之间达极显著相关水平 ( $p < 0.01$ )。

表 4 主要主成分系数特征值及贡献率

Tab. 4 Calculation coefficient and cumulative contribution proportions of main principle components

主成分	$I_{150}$	$\theta$	$E_c$	$F_D$	$D_p$	$R_d$	$w_{\text{TN}}$	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
$f_1$	0.437	0.489	0.294	0.228	-0.498	0.146	-0.403	3.494	49.92	49.92
$f_2$	0.333	-0.024	0.388	-0.557	0.140	0.549	0.327	2.590	37.01	86.93

表 5 各处理主要主成分、综合主成分、综合改良效果分析

Tab. 5 Analysis of principle component, comprehensive principle component and effect of soil improvement

处理	主要主成分		综合主成分		改良土壤 综合效果	排名
	$f_1$	$f_2$	$d_i^+$	$d_i^-$		
T1	-3.793	-0.385	4.351	0.826	0.160	7
T2	-0.330	-1.743	2.962	2.447	0.452	6
T3	1.881	-1.445	2.336	4.013	0.632	3
T4	1.023	-1.249	2.298	3.416	0.598	5
T5	-0.332	1.092	1.753	2.992	0.631	4
T6	1.311	1.335	0.760	4.063	0.842	1
T7	0.240	2.395	1.159	3.802	0.766	2
权重	0.499	0.370				
$f_1^+$	1.881	2.395				
$f_1^-$	-3.793	-1.743				

### 3.3 改良效果正态性检验

对表中不同预处理麦秸对土壤的改良效果综合指标(均值为 0.583, 标准差为 0.22)采用 SPSS 软件进行 Kolmogorov - Smirnova (D 检验) 及 Shapiro - Wilk (W 检验) 检验。结果显示, Kolmogorov - Smirnova 值为 0.240 957, 渐近显著性概率为 0.200, 大于给定的显著性水平 0.05; Shapiro - Wilk 值为 0.913 577, 渐近显著性概率为 0.421, 大于给定的显著性水平 0.05。结合 SPSS 规定: 如果指定的是非整数权重, 则在加权样本位于 3 ~ 50 之间时, 参照文献[22]计算 Shapiro - Wilk 统计量。本研究中, 样本容量  $n = 7$ , W 检验的值为 0.913 577 ( $p = 0.421$ ), 计算出的 W 值确定的概率  $p > 0.05$ , 不能拒绝检验假设, 可以认为该样本资料服从正态分布。

说明综合改良效果具有较好的代表性和客观性,可以作为不同预处理麦秸还田土壤改良效果的评定指标。

## 4 结论

(1) 氨化秸秆措施(调节秸秆 C/N 值)对土壤的综合改良效果具有明显的促进作用,当其与无机土壤改良剂(硫酸钙、硫酸铝)混合配施具有较优的土壤改良综合效果;粉碎秸秆与无机土壤改良剂(硫酸钙、硫酸铝)混合配施也较单施粉碎秸秆、长秸秆处理具有较优的土壤改良效果。氨化秸秆、粉碎秸秆与硫酸钙改良剂混合配施均比与硫酸铝改良剂混合配施的土壤改良效果优。

(2) 运用综合主成分指标评价对不同预处理秸秆还田土壤后对土壤入渗特性、土壤水分有效性、持水性、结构稳定性、土壤孔隙、秸秆分解率、土壤全氮

含量 7 个方面的改良土壤效果进行了综合评价。结果表明,采用主成分分析方法对不同预处理麦秸对土壤改良效果进行评价,可在不损失或较少损失原有指标变异信息的情况下,将多个评价指标转换为一个改良效果综合主成分评价变量,改良效果综合主成分可以代表 86.93% 的不同预处理麦秸改良效果变异信息,且服从正态分布,具有较好的代表性和客观性,可以用于预处理麦秸改良土壤效果的评价与比较。

(3) 本研究仅对麦秸进行氨化处理和粉碎处理条件下,在等同环境中的改良效果进行了模拟研究。尽管该研究有一定的局限性,但仍能从统计意义上描述不同预处理秸秆还田后的改良效果。在田间尺度下,土壤质地、土壤水分和温度等环境因子对土壤中外源性有机物料的影响还需进一步研究。

## 参 考 文 献

- BLANCO-CANQUI H, LAI R. Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2004, 23(6): 481-504.
- SONNLEITNER R, LORBEER E, SCHINNER F. Effects of straw, vegetable oil and whey on physical and microbiological properties of a chernozem[J]. *Applied Soil Ecology*, 2003, 22(3): 195-204.
- ALAGOZ Z, YILMAZ E. Effects of different sources of organic matter on soil aggregate formation and stability: a laboratory study on a Lithic Rhodoxeralf from Turkey[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 103(2): 419-424.
- 杨志臣, 吕貽忠, 张凤荣, 等. 秸秆还田和腐熟有机肥对水稻土培肥效果对比分析[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(3): 214-218.  
YANG Zhichen, LÜ Yizhong, ZHANG Fengrong, et al. Comparative analysis of the effects of straw-returning and decomposed manure on paddy soil fertility betterment[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(3): 214-218. (in Chinese)
- 于锐, 王其存, 朱平, 等. 长期不同施肥对黑土团聚体及有机碳组分的影响[J]. *土壤通报*, 2013, 44(6): 594-600.  
YU Rui, WANG Qicun, ZHU Ping, et al. Effects of long term fertilization on aggregate and fractions of organic carbon in black soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(6): 594-600. (in Chinese)
- SPACCINI R, PICCOLO A, HABERHAUER G, et al. Decomposition of maize straw in three European soils as revealed by drift spectra of soil particle fractions[J]. *Geoderma*, 2001, 99(3-4): 245-260.
- CABILES D M S, ANGELES O R, JOHNSON-BEEBOUT S E, et al. Faster residue decomposition of brittle stem rice mutant due to finer breakage during threshing[J]. *Soil and Tillage Research*, 2008, 98(2): 211-216.
- TARAFDAR J C, MEENA S C, KATHJU S. Influence of straw size on activity and biomass of soil microorganisms during decomposition[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2001, 37(3): 157-160.
- TEJADA M, HERNANDEZ M T, GARCIA C. Soil restoration using composted plant residues: effects on soil properties[J]. *Soil and Tillage Research*, 2008, 102(1): 1-9.
- 李伟, 蔺树生, 谭豫之, 等. 作物秸秆综合利用的创新技术[J]. *农业工程学报*, 2000, 16(1): 14-17.  
LI Wei, LIN Shusheng, TAN Yuzhi, et al. Innovated techniques on comprehensive utilization of crop straw[J]. *Transactions of the CSAE*, 2000, 16(1): 14-17. (in Chinese)
- 辜松, 刘立意, 小松崎将一, 等. 覆盖作物对土壤物理特性及旋耕作业的影响分析[J]. *农业机械学报*, 2005, 36(5): 41-44.  
GU Song, LIU Liyi, KOMATSUZAKI Masakazu, et al. Effect of cover crops on soil physical properties and rotary tillage[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2005, 36(5): 41-44. (in Chinese)
- 李爱宗, 张仁陟, 王晶. 耕作方式对黄绵土水稳定性团聚体形成的影响[J]. *土壤通报*, 2008, 39(3): 480-484.  
LI Aizong, ZHANG Renzhi, WANG Jing. Effect of tillage methods on the formation of water-stable aggregates in Loess soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(3): 480-484. (in Chinese)
- 邵玉翠, 任顺荣, 廉晓娟, 等. 施用脱硫石膏与天然有机物混合改良剂对盐化潮土理化性质及玉米产量的影响[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(7): 285-289.  
SHAO Yucui, REN Shunrong, LIAN Xiaojuan, et al. Effects of soil combination amendments of gypsum and natural organic matter on chemical and physical properties of salinized fluvo-aquic soil and maize yield[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(7): 285-289. (in Chinese)
- 李孝良, 陈效民, 徐克琴, 等. 肥料与石膏配施对滨海盐土油菜生长及养分吸收的影响[J]. *土壤通报*, 2012, 43(5): 1221-1226.

- LI Xiaoliang, CHEN Xiaomin, XU Keqin, et al. Effects of fertilizer with gypsum application on growing development and nutrient uptake of potting rape in coastal saline soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(5): 1221 – 1226. (in Chinese)
- 15 张密密, 陈诚, 刘广明, 等. 适宜肥料与改良剂改善盐碱土壤理化特性并提高作物产量[J]. 农业工程学报, 2014, 30(10): 91 – 98.  
ZHANG Mimi, CHEN Cheng, LIU Guangming, et al. Suitable utilization of fertilizer and soil modifier to ameliorate physicochemical characteristics of saline-alkali soil and increase crop yields[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(10): 91 – 98. (in Chinese)
- 16 王珍, 冯浩. 秸秆不同还田方式对土壤结构及土壤蒸发特性的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6): 224 – 228, 251.  
WANG Zhen, FENG Hao. Study on the influence of different straw-returning manners on soil structure and characters of soil water evaporation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(6): 224 – 228, 251. (in Chinese)
- 17 王增丽, 冯浩, 方圆. 麦秸不同预处理方式对黄绵土结构及低吸力段持水性的影响[J]. 农业机械学报, 2012, 43(7): 56 – 62, 72.  
WANG Zengli, FENG Hao, FANG Yuan. Effect of pretreated wheat straw on soil aggregate and water-holding capacity within low suctions in Loess soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(7): 56 – 62, 72. (in Chinese)
- 18 王增丽, 王珍, 冯浩. 预处理秸秆对土壤蒸发及秸秆分解率的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(9): 816 – 821.  
WANG Zengli, WANG Zhen, FENG Hao. Effects of pretreated straws on soil evaporation and straw decomposition rate [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(9): 816 – 821. (in Chinese)
- 19 毛华明, 朱仁俊, 冯仰廉. 饲喂复合化学处理大麦秸颗粒对泌乳牛生产性能的影响[J]. 云南农业大学学报, 1999, 14(2): 167 – 170.  
MAO Huaming, ZHU Renjun, FENG Yanglian. Effects on the performances of Holstein cows fed pelleted barley straw treated with urea and calcium hydroxide [J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 1999, 14(2): 167 – 170. (in Chinese)
- 20 袁志发, 孟德顺. 多元统计分析[M]. 杨凌: 天则出版社, 1993.
- 21 贺新, 杨培岭, 任树梅, 等. 基于主成分分析的油葵微咸水调亏灌溉灌水效果评价[J]. 农业机械学报, 2014, 45(增刊): 162 – 167.  
HE Xin, YANG Peiling, REN Shumei, et al. Evaluation of regulated deficit irrigation performance with saline water based on principal component analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.): 162 – 167. (in Chinese)
- 22 刘庆武, 胡志艳. 如何用 SPSS、SAS 统计软件进行正态性检验[J]. 湘南学院学报: 自然科学版, 2005, 7(3): 56 – 58.  
LIU Qingwu, HU Zhiyan. How to use SPSS, SAS statistical software for normality test [J]. Journal of Xiangnan University: Natural Sciences, 2005, 7(3): 56 – 58. (in Chinese)

(上接第 192 页)

- 26 GOODIN D G, HUTCHINSON J M S, VANDERLIP R L, et al. Estimating solar irradiance for crop modeling using daily air temperature data[J]. Agronomy Journal, 1999, 91(5): 845 – 851.
- 27 WEISS A, HAYS C J, HU Q, et al. Incorporating bias error in calculating solar irradiance: implications for crop simulations[J]. Agronomy Journal, 2001, 93(6): 1321 – 1326.
- 28 DONATELLI M, CAMPBELL G S. A simple model to estimate global solar radiation[C] // Proceedings of the Fifth Congress of the European Society for Agronomy, 1998: 133 – 134.
- 29 ANNANDALE J, JOVANOVIĆ N, BENADÉ N, et al. Software for missing data error analysis of Penman – Monteith reference evapotranspiration[J]. Irrigation Science, 2002, 21(21): 57 – 67.
- 30 CHEN R, KANG E, YANG J, et al. Validation of five global radiation models with measured daily data in China[J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45(45): 1759 – 1769.
- 31 DE J R, STEWART D W. Estimating global solar radiation from common meteorological observations in western Canada[J]. Canadian Journal of Plant Science, 1993, 73(2): 509 – 518.
- 32 HUNT L A, KUCHAR L, SWANTON C J. Estimation of solar radiation for use in crop modelling[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1998, 91(3 – 4): 293 – 300.
- 33 CORTES C, VAPNIK V. Support-vector networks[J]. Machine Learning, 1995, 20(3): 273 – 297.
- 34 VAPNIK V N. The nature of statistical learning theory[M]. New York: Springer-Verlag, 1995.
- 35 ABRAHA M G, SAVAGE M J. Comparison of estimates of daily solar radiation from air temperature range for application in crop simulations[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(3): 401 – 416.
- 36 ANTONANZAS-TORRES F, URRACA R, ANTONANZAS J, et al. Generation of daily global solar irradiation with support vector machines for regression[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 96: 277 – 286.
- 37 CHEN J L, LI G S. Evaluation of support vector machine for estimation of solar radiation from measured meteorological variables [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2014, 115(3 – 4): 627 – 638.