文章编号:1000-7601(2015)04-0008-08 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2015.04.002

耕作措施与秸秆还田对小麦 – 玉米轮作体系土壤质量的影响

王淑娟[1],李有兵[1],吴玉红[1,2],田霄鸿[1],
王少霞[1],闫小丽[3],朱瑞祥[3]

(1.西北农林科技大学资源环境学院,农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100;
2.汉中市农业科学研究所, 陕西 汉中 723002; 3.西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 通过在陕西关中平原地区连续 7 年的田间定位试验,运用多元方差分析及因子分析法比较评价了冬小麦 – 夏玉米轮作体系下 4 种耕作措施(深松、旋耕、免耕、传统耕作)及 2 种秸秆管理措施(玉米秸秆还田、不还田)对土壤质量的影响。结果表明:玉米收获后 0 ~ 20 cm 土壤容重免耕处理最大,旋耕、翻耕处理次之,深松处理最小;秸秆还田 0 ~ 10 cm 土壤容重较不还田处理降低 2.33%,达显著水平。小麦、玉米收获后 0 ~ 20 cm 土壤养分组、有机质环境组及酶活性组指标变量受不同耕作措施的影响均大于受秸秆管理措施的影响。传统耕作两季土壤质量均最差。深松、旋耕有一定后效,且有机质养分因子得分较高,免耕则相反。综合土壤质量、作物产量及经济效益,玉米秸秆还田/深松/旋耕/播种小麦 – 小麦秸秆高留茬/免耕/播种玉米模式适宜在该区推广。

关键词: 保护性耕作;秸秆还田;小麦 – 玉米轮作体系;土壤质量评价

中图分类号: S158.3 **文献标志码:** A

Effects of tillage and residue management on soil quality in a wheat-maize cropping system

WANG Shu-juan[1], LI You-bing[1], WU Yu-hong[1,2], TIAN Xiao-hong[1],
WANG Shao-xia[1], YAN Xiao-li[3], ZHU Rui-xiang[3]

(1. *College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University; Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*;
2. *Institute of Agricultural Science of Hanzhong, Hanzhong, Shaanxi* 723002, *China*;
3. *College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: To determine reasonable cultivation mode for dryland farming practice, the effects of tillage and residue management on soil properties were compared in a winter wheat-summer maize cropping system. This experiment was conducted during the seven consecutive years of 2002—2009 in Guanzhong plain of Shaanxi province. Treatments included 8 factorial combinations of four tillage practices: subsoiling tillage (ST), rotary tillage (RT), no tillage (NT), conventional tillage (CT), and maize residue (with or without) management. Soil samples were collected after wheat harvest in June 2009 and maize harvest in October 2009. The highest soil bulk density in the 0 ~ 10 cm soil layer after maize harvest was observed under NT, followed by that for CT and RT, and the lowest value was observed under ST. Compared with maize residue removed treatment (– r), soil bulk density in the 0 ~ 10 cm soil layer under residue retained treatment (+ r) was significantly decreased by 2.33%. Multivariate analyses were used to select appropriate soil quality indicators. The results showed that the three soil property groups (i.e. soil nutrient group, soil organic matter and environment group, enzymatic activity group) responded more to tillage practice than to residue management. CT resulted in the poorest soil quality in both seasons. The residual effects of ST and RT on soil quality were found in maize season. Additionally, scores for soil organic matter and nutrient factor under ST and RT were higher in both seasons, but the opposite

收稿日期:2014-09-22
基金项目:国家科技支撑计划项目(2012BAD14B11);国家自然科学基金项目(41371288,31071863)
作者简介:王淑娟(1986—),女,山西临汾人,博士,主要从事旱地土壤肥力质量提升研究。E-mail: wangshujuan922@163.com。
通信作者:田霄鸿(1967—),男,甘肃天水人,教授,主要从事农业废弃物资源循环利用方面的研究。E-mail: txhong@hotmail.com。

occurred in NT. Based on soil quality, crop yield and economic benefit, the practice of the subsoiling rotary tillage plus residue retained to wheat combined with no tillage plus high stubble mulching to maize can be promoted in such dryland regions.

Keywords: conservation tillage; residue management; winter wheat-summer maize rotation; soil quality assessment

小麦、玉米种植对粮食生产及畜牧业发展具有重要意义。2012 年全国小麦、玉米产量之和占当年谷物总产量的 61%,其中北方旱地生产占二者产量之和的 50%以上[1]。然而,生产两季作物全生育期需水 875 mm[2],北方旱区自然降水不足且分布不均,水分亏缺是限制该区农业发展的主要因素。选用适宜的土壤管理措施可以有效缓解水分胁迫现状,实现作物高产稳产。采用免耕秸秆覆盖模式可提高土壤保蓄能力、减少蒸发损失、提高水分有效性[3-4],而长期免耕导致土壤紧实[5-6]、养分分层化现象显著[7-8]、土壤耕层变浅。传统翻耕虽能降低土壤容重、有效去除杂草,但长期实施不利于土壤有机碳累积,需高投入(高水高肥)才能维持高产出[9]。深松亦能有效打破犁底层,促进水分入渗、根系下扎[10],并有一定的后效[5]。秸秆还田可提高土壤肥力、降低化肥投入[11],但增产效果尚有争议[12]。判定以上不同耕作还田措施是否有利于农业可持续发展,需要进行土壤质量评价。土壤质量概念正是以“土壤管理措施改善、维持或恶化了土壤功能”为基础建立的[13],即不适宜的土壤管理措施可能会引起土壤质量退化。近年来,土壤质量评价过程主要涉及评价指标的筛选(寻找新敏感指标、如何建立最小数据库集(MDS)等)[14-16],数学评价方法的探讨[17-20]等方面。目前,“免耕秸秆还田模式的土壤质量优于传统翻耕”已被大量评价结果所证实[15,21-22]。然而,针对其他保护性耕作措施(深松、旋耕等)的研究主要围绕于其对土壤属性指标影响的差异等方面[5-6,10,23-26],进行系统质量评价的较少[27]。因此,本文将以陕西关中平原典型的冬小麦 – 夏玉米一年两熟轮作体系为研究对象,采用多元方差分析、因子分析等方法筛选对不同土壤管理措施响应敏感的土壤质量指标,探讨长期深松、旋耕、免耕、翻耕及秸秆还田对土壤质量的影响,从土壤质量角度确立能够可持续发展的、适于该区推广的耕作还田模式。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验地位于陕西杨凌西北农林科技大学农作一站,海拔 524.7 m,属温带大陆性季风气候。年均气温 13℃,年均降水量 632 mm,其中 7—9 月三个月降水量约占全年的 60%,年均水面蒸发量 990 mm,属半湿润易旱地区。≥10℃积温 4 185℃,无霜期 221 d,地下水位深 110 m。土壤肥力中上等,土地平整,具有一定灌溉条件,在关中平原一年两熟区及同类地区具有代表性。

供试土壤为垆土,系统分类为土垫旱耕人为土,且为石灰性土壤。0 ~ 20 cm 耕层土壤基础养分状况:有机质含量 14.63 g·kg^{-1},全氮 0.99 g·kg^{-1},碱解氮 88.14 mg·kg^{-1}、速效磷 8.94 mg·kg^{-1},速效钾 151.7 mg·kg^{-1}[27]。2008—2009 年冬小麦 – 夏玉米一个轮作周期内降水量为 624.4 mm。

1.2　试验设计及田间管理

本试验为长期定位试验,始于 2002 年,种植制度为冬小麦 – 夏玉米一年两熟制。田间采用完全随机区组设计,小麦生长季设置不同耕作及秸秆管理措施两个试验因素。其中,耕作措施设 4 个水平,即深松(SR,只松土、不翻土,耕层土体呈纵向虚实间隔状态,深松铲间距 40 cm,深松深度 30 cm),旋耕(RT,耕层土壤在旋耕刀切削作用下形成细碎疏松层,旋耕深度 10 ~ 12 cm),免耕(NT)和传统耕作(CT,翻土,将作物残茬翻埋至下层,翻耕深度 20 ~ 22 cm)。秸秆管理措施设 2 个水平,即玉米秸秆还田(+r,全量还田)和不还田(–r)。共 8 个处理,即小麦季分别采用玉米秸秆还田/深松/旋耕/播种(ST+r)、裸地/深松/旋耕/播种(ST–r)、玉米秸秆还田/旋耕/播种(RT+r)、裸地/旋耕/播种(RT–r)、玉米秸秆还田/免耕/播种(NT+r)、裸地/免耕/播种(NT–r)、玉米秸秆还田/翻耕/旋耕/播种(CT+r)、裸地/翻耕/旋耕/播种(CT–r)模式。重复 3 次,小区南北长 43.3 m,东西宽 21 m,试验区总面积 2.18 hm^2。

玉米生长季只设置一个处理,即小麦秸秆高留茬(留茬高度 30 cm)/免耕/播种。

2008 年 10 月 8 日播种小麦,品种为‘西农 889’,播种量 97.5 kg·hm^{-2},2009 年 6 月 10 日收获小麦;2009 年 6 月 12 日播种玉米,品种为‘郑单 958’,播种量 52.5 kg·hm^{-2},2009 年 10 月 11 日收获玉米。小麦播前结合整地各处理均基施 N 180 kg·hm^{-2}、P_2O_5 120 kg·hm^{-2},冬季结合灌水追施 N 70 kg·hm^{-2}。玉米生长季,于苗期追施 N 172.5 kg·hm^{-2}。氮、磷肥

分别为普通尿素(N≥46%)和磷酸二铵(15N - 42P - 0K)。采用化学防除,即玉米播种后,用 96% 金都尔乳油 1 050 mL·hm^{-2}进行封闭处理;玉米 4 ~ 6 叶期,用 55% 耕杰 1 800 mL·hm^{-2} + 助剂兑水喷雾。小麦播种时,除 NT + r 处理使用碎秆免耕施肥播种机外,其余处理均使用条播机播种;玉米均使用免耕播种机播种。

1.3 样品采集及测定

分别于 2009 年 6 月小麦收获后及 10 月玉米收获后用土钻采集 0 ~ 20 cm 耕层土壤样品,每区"S"形选取 5 ~ 7 点采样,混合均匀后风干,依次过 1 mm、0.25 mm 筛,测定土壤有机质($K_2Cr_2O_7$ 外加热法),活性有机碳($KMnO_4$ 氧化法),全氮(半微量开氏法),全磷(NaOH 熔融 - 钼锑抗比色法),全钾(NaOH 熔融 - 火焰光度法),碱解氮(碱解扩散法),速效磷(Olsen 法),速效钾(NH_4OAc 浸提 - 火焰光度法),阳离子交换量 CEC(乙酸钠浸提 - 火焰光度法),电导率 EC(水∶土 = 2.5∶1,DDS - 307 电导率仪),有效 Zn、Cu、Fe、Mn(DTPA - TEA 浸提 - AAS 法),脲酶(苯酚钠比色法)及碱性磷酸酶(磷酸苯二钠比色法)等土壤化学、生物学指标。另于 2009 年 10 月玉米收获后用环刀采集 0 ~ 10 cm、0 ~ 20 cm 土壤样品测定土壤容重[28 - 30]。

1.4 数据处理

小麦季和玉米季试验数据分别运用 SPSS 16.0 软件进行完全随机区组设计的方差分析及差异显著性检验(*LSD* 法,α = 5%),多元方差分析(Wilk's Lambda 法)及因子分析。运用 Microsoft Excel 2007 软件作图。

因子分析,目标是从尽可能多的变量中概括出相互独立的影响因素,试图寻找相互独立的指标变量和解释变量,解决共性、提取、旋转、因子得分估计等问题。评价步骤:① 指标筛选。以相同标准选取土壤肥力指标变量,建立原始数据矩阵。② 提取因子,确定因子数量。依据 Kaiser 准则(因子特征值 > 1)或累计方差贡献率 > 85% 的原则提取因子。③ 因子阐释。用最大方差法对初始因子载荷矩阵进行旋转,得到的新矩阵包含了变量与旋转后因子之间的相关性,易于因子阐释。④ 因子得分。将旋转后的因子作为自变量进行回归分析,计算各处理因子得分值,并作图[15,22,27,31]。

2 结果与分析

2.1 不同耕作措施与秸秆还田对土壤容重的影响

小麦季不同耕作措施对土壤容重的影响在玉米季有一定后效。长期免耕(两季均免耕)使土壤愈加紧实,机械扰动及秸秆还田均能降低土壤容重,各处理土壤容重随土层深度增加而增加(表 1)。因机械扰动程度不同,耕作措施对土壤容重影响不同,其中免耕处理土壤容重最大,与传统耕作(小麦季翻耕、玉米季免耕)相比,0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm 分别显著增加 3.94%、10.64%($P \leqslant 0.05$);深松处理(小麦季深松、玉米季免耕)最小,但与传统耕作无显著差异。因旋耕深度(约 10 cm)小于翻耕深度(约 20 cm),导致 10 ~ 20 cm 土壤容重旋耕处理显著大于翻耕处理。秸秆还田对土壤容重的影响小于耕作措施的影响(表 1)。与一季秸秆还田(- r)相比,两季作物秸秆还田(+ r)0 ~ 10 cm 土壤容重显著降低 2.33%($P \leqslant 0.05$),而 10 ~ 20 cm 降低趋势不显著。

表 1 耕作措施与秸秆还田对玉米季土壤容重的影响/(g·cm^{-3})

Table 1 Effects of tillage and residue management on soil bulk density after maize harvest

研究因素 Factor	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm
耕作措施 Tillage (T)		
深松 Subsoiling tillage (ST)	1.25b	1.37c
旋耕 Rotary tillage (RT)	1.26b	1.49b
免耕 No tillage (NT)	1.32a	1.56a
传统耕作 Conventional tillage (CT)	1.27b	1.41c
秸秆管理措施 Residue (R)		
玉米秸秆还田 With maize residue (+ r)	1.26b	1.45
玉米秸秆不还田 Without maize residue (- r)	1.29a	1.46
变异来源 Sources of variation	*P* 值 *P* values	
耕作措施 Tillage (T)	0.008	0.002
秸秆管理措施 Residue (R)	0.026	ns
耕作 × 秸秆管理措施 Tillage × Residue (T × R)	ns	ns

注:不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$);ns,差异不显著($P < 0.05$)。下同。

Note: Different letter are significantly different at $P < 0.05$; ns, non-significant at $P < 0.05$, and hereinafter.

2.2 不同耕作措施与秸秆还田下土壤质量的因子分析

2.2.1 指标筛选 分别将两季作物收获后测定的 0 ~ 20 cm 土壤的 16 个指标变量分成三组,即土壤养分组、有机质环境组和酶活性组,用多元方差分析(MANOVA)中的 Wilk's Lambda 法检验各组变量是否至少受一个研究因素的显著影响($P \leqslant 0.05$)。结果表明,耕作措施显著影响此三组指标变量,而秸秆

还田仅显著影响小麦收获后的土壤酶活性指标($P \leqslant 0.05$)(表 2),各处理小麦秸秆均高留茬还田的做法缩小了不同玉米秸秆还田措施对土壤肥力影响的差异。另外,施肥灌水也可能会掩盖秸秆还田的培肥效果。所以在确定土壤质量评价候选指标时,除考虑小麦收获后秸秆还田对土壤酶活性的影响外,只考虑耕作措施对各指标的影响。

表 2　耕作与秸秆还田对土壤属性指标影响的多元方差分析(P 值)

Table 2　Significance of management factors on soil response groups based on multivariate Wilk's Lambda F statistics

土壤指标分组 Soil property group	小麦收获后 After wheat harvest			玉米收获后 After maize harvest		
	耕作措施 Tillage (T)	秸秆管理措施 Residue (R)	耕作 × 秸秆 T × R	耕作措施 Tillage (T)	秸秆管理措施 Residue (R)	耕作 × 秸秆 T × R
土壤养分组 Soil nutrient	< 0.001	ns	0.011	< 0.001	ns	< 0.001
有机质环境组 Organic matter and environment	< 0.001	ns	ns	< 0.001	ns	0.010
酶活性组 Enzymatic activity	< 0.001	0.007	0.003	< 0.001	ns	< 0.001

在多元方差分析基础上(表 2),通过对各土壤属性指标进行完全随机区组设计的方差分析(ANOVA),筛选对不同耕作和秸秆管理措施响应显著的指标($P \leqslant 0.05$)作为土壤质量评价的候选指标(表 3)。其中,小麦季最终由有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾、有效锌、铁、锰、脲酶和碱性磷酸酶 12 个指标变量构成因子分析中的原始数据矩阵;玉米季由有机质、全氮、全钾、速效磷、CEC、有效锌、锰、脲酶和碱性磷酸酶 9 个指标变量构成原始数据矩阵。土壤活性有机碳比有机碳更能灵敏地指示土壤碳库变化,但因该指标三个区组测定值之间的变异系数较大而未能成为候选指标。不同耕作措施对当季(小麦季)多数土壤属性指标的影响大于对下季(玉米季)的影响(表 3)。

表 3　耕作与秸秆管理措施对土壤属性指标影响的方差分析(P 值)

Table 3　Significance of management factors on soil properties based on ANOVA

土壤指标 Soil property		小麦收获后 After wheat harvest			玉米收获后 After maize harvest		
		耕作措施 Tillage (T)	秸秆管理措施 Residue (R)	耕作 × 秸秆 T × R	耕作措施 Tillage (T)	秸秆管理措施 Residue (R)	耕作 × 秸秆 T × R
土壤养分组 Soil nutrient	全氮 Total N[mn]	< 0.001	ns	ns	0.004	0.016	ns
	全磷 Total P[m]	0.001	0.013	0.004	ns	ns	ns
	全钾 Total K[mn]	0.025	0.002	ns	< 0.001	ns	0.004
	碱解氮 Available N[m]	0.026	ns	0.035	ns	ns	ns
	速效磷 Available P[mn]	0.006	ns	0.017	0.011	ns	0.035
	速效钾 Available K[m]	< 0.001	ns	0.023	ns	ns	ns
	有效锌 DTPA – Zn[mn]	0.007	ns	ns	< 0.001	0.011	ns
	有效铜 DTPA – Cu	ns	< 0.001	< 0.001	ns	ns	ns
	有效铁 DTPA – Fe[m]	< 0.001	0.007	< 0.001	ns	ns	ns
	有效锰 DTPA – Mn[mn]	0.006	ns	ns	0.017	0.045	0.008
有机质环境组 Organic matter and environment	有机质 Organic matter[mn]	< 0.001	ns	ns	0.023	ns	0.041
	活性有机碳 Labile organic C	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	CEC[n]	ns	ns	ns	0.041	ns	ns
	EC	ns	ns	ns	ns	ns	ns
酶活性组 Enzymatic activity	脲酶 Urease[mn]	0.024	ns	ns	0.017	ns	ns
	碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase[mn]	ns	0.001	0.015	0.007	ns	0.030

注:m,小麦季土壤质量评价候选指标;n,玉米季土壤质量评价候选指标。

Note: m, properties were retained for soil quality assessment in wheat season. n, properties were retained for soil quality assessment in maize season.

2.2.2 因子提取及阐释 将原始数据标准化,计算得到各变量的相关系数矩阵。其中,小麦季有 20 对相关系数达 5%差异显著性水平,玉米季有 22 对达 5%显著水平。做因子分析时,采用最大方差法得到旋转因子载荷矩阵,依据 Kaiser 准则小麦季提取了三个因子,累积方差贡献率为 84.63%,即这三个因子所解释的方差占总体方差的 84.63%,其中前两个因子的累积方差贡献率为 67.20%(表 4)。小麦季第一因子(F1)上具有较高旋转因子载荷的变量包括有机质、碱解氮、速效钾、有效锌、铁、锰。虽然需较长年限才能检测到有机质含量的变化,但其在改善土壤肥力和保护大气环境等方面均起重要作用,是土壤质量评价中不可或缺的指标[18,32];有效锌虽具有最高载荷,但有机质与有效锌及其他变量均具有显著相关性($P \leqslant 0.05$),故将 F1 命名为有机质养分因子 1。第二因子(F2)上具有较高旋转因子载荷的变量包括全氮、全钾、速效磷,将其命名为养分储藏因子。第三因子(F3)上具有较高旋转因子载荷的变量包括全磷、脲酶、碱性磷酸酶,将其命名为酶活性因子。

玉米季依据 Kaiser 准则提取了两个因子,累积方差贡献率为 78.62%(表 4)。F1 上具有较高旋转因子载荷的变量包括全氮、速效磷、CEC、脲酶、碱性磷酸酶。其中,全氮和速效磷反映了土壤供给作物养分能力的大小;CEC 指土壤胶体所能吸附各种阳离子的总量,其大小可作为评价土壤保肥能力的指标;脲酶能将酰胺态有机氮化物水解转化为植物可以直接吸收利用的无机氮化物,其活性变化在一定程度上可反映土壤供氮能力[33];土壤磷酸酶能酶促酯磷盐键的水解性裂解,加速有机磷的脱磷速度,提高土壤磷素的有效性,故将 F1 命名为保肥供肥因子。F2 上具有较高旋转因子载荷的变量包括有机质、全钾、有效锌、锰,将其命名为有机质养分因子 2。

表 4 旋转后的因子分析结果

Table 4 Results of factor analysis using varimax rotation for each of the retained soil properties

土壤指标 Soil property	小麦收获后 After wheat harvest			玉米收获后 After maize harvest	
	F1	F2	F3	F1	F2
全氮 Total N	-0.345	0.761	0.339	0.842	0.418
全磷 Total P	0.464	-0.330	0.732		
全钾 Total K	0.063	-0.946	0.216	0.439	0.805
碱解氮 Available N	0.880	0.278	-0.047		
速效磷 Available P	0.027	0.937	0.184	0.964	0.038
速效钾 Available K	0.845	-0.324	-0.189		
有效锌 DTPA-Zn	0.950	-0.047	-0.041	0.392	0.682
有效铁 DTPA-Fe	-0.720	0.623	0.042		
有效锰 DTPA-Mn	0.753	-0.261	0.197	0.173	0.839
有机质 Soil organic matter	0.940	-0.118	0.184	0.029	0.902
CEC				-0.635	-0.244
脲酶 Urease	0.155	0.279	0.750	-0.948	-0.185
碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase	-0.376	0.068	0.827	0.876	0.299
特征值 Eigenvalue	4.860	3.200	2.090	4.090	2.990
方差贡献率 Proportion/%	40.540	26.660	17.430	45.390	33.230
累积方差贡献率 Cumulative/%	40.540	67.200	84.630	45.390	78.620

2.2.3 因子得分比较 用线性回归法计算各处理因子得分,因子得分回归函数 F_i 表达式为:

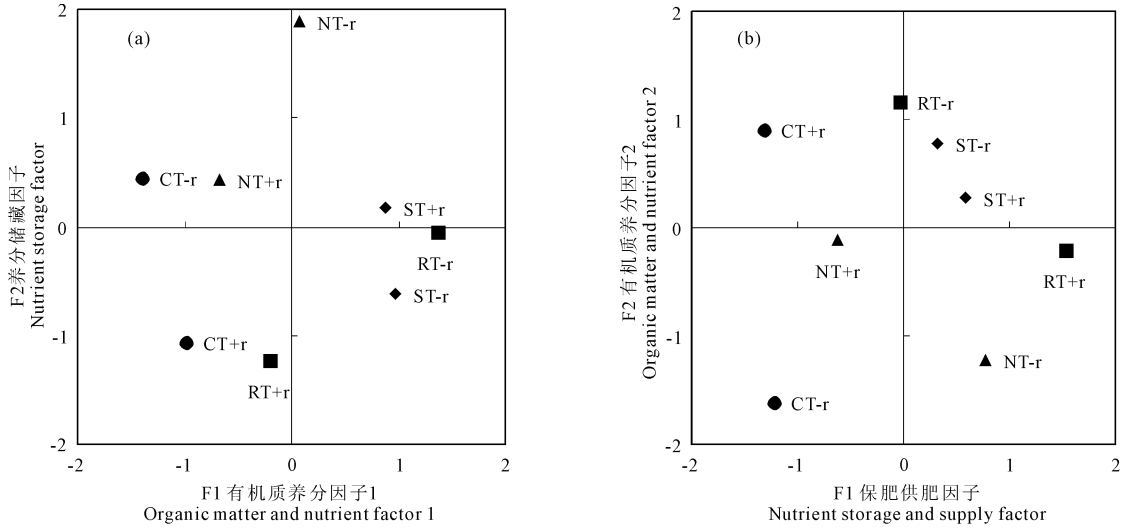
$$F_i = b_i Z X_p$$

式中,b_i 为因子得分系数矩阵的第 i 列向量,ZX_p 为 p 个指标 X_1, X_2, Λ, X_p 标准化后的向量。

用各处理在 F1、F2 上的因子得分做图(图 1),图中各点较分散,说明长期耕作及秸秆还田已对土壤质量产生明显影响。小麦季(图 1a)耕作措施有机质养分因子 1(F1)得分 ST > RT > NT > CT,深松处理土壤有机质、碱解氮、速效钾、有效锌、锰含量较高,传统耕作则相反。耕作措施养分储存因子(F2)得分 NT > ST > CT > RT,免耕处理土壤全氮、速效磷含量较高。

玉米季(图 1b)耕作措施保肥供肥因子(F1)得

分 RT > ST > NT > CT,保护性耕作措施均优于传统耕作。耕作措施有机质养分因子 2(F2)得分 ST > RT > CT > NT,与小麦季 F1 得分规律较一致,深松、旋耕具有一定后效;而免耕有机质养分问题日益突出。综合两季评价结果,深松、旋耕土壤质量较好,传统耕作无论玉米秸秆还田与否土壤质量均最差。



注:a,小麦收获后;b,玉米收获后。　Note: a, after wheat harvest; b, after maize harvest.

图 1　耕作与秸秆管理措施对土壤属性指标影响的因子得分

Fig. 1　Biplot of tillage and residue management effects on factor scores

3　讨　论

3.1　耕作措施与秸秆还田对土壤容重的影响

本试验各耕作措施 10 ~ 20 cm 土壤容重均较大(表 2),与玉米均为免耕播种有关。其中,NT 处理长期两季免耕,10 ~ 20 cm 土壤容重大于 1.50 g·cm^{-3},亟需打破犁底层、降低机械阻力,以免影响作物正常生长。若采用传统翻耕打破犁底层可能会引起一些负面影响,如 López – Garrido 等[34]对已免耕 10 年的土壤翻耕一次后发现,当季小麦出苗率、养分利用效率及产量虽略有增加,但随后两年均呈相反趋势;当季土壤质量下降,且随后两年持续下降。另外,Birkás 等[24]报道每年耙耕、翻耕与深松相比,3 年内会导致亚表层土壤紧实、5 年后表层及深层土壤亦趋于紧实。而 López – Fando 等[5]通过比较 4 种耕作措施发现,深松当季即可改善土壤物理性状,但后效有限。丁昆仑和 Hann[23]研究表明深松对土壤容重的影响随试验年限延长而减弱,每 3 ~ 4 年则需深松一次。因此,建议通过定期深松而不是翻耕来降低土壤容重。

耕作可将作物秸秆混入土体,如 López – Fando 等[5]报道,红豌豆播种后免耕处理 85% 的作物秸秆留于地表,免耕 + 深松为 55%,少耕仅为 15%,传统耕作则几乎全部混入土体;Lampurlanés 和 Cantero – Martínez[10]也有类似报道。本试验玉米秸秆还田处理 0 ~ 10 cm 土壤容重显著低于秸秆不还田处理($P \leqslant 0.05$),而 10 ~ 20 cm 土壤未受影响,可能与秸秆还田年限尚短有关。

3.2　耕作措施与秸秆还田对土壤质量的影响

免耕处理土壤质量较差。小麦季免耕处理 F1 因子得分为 – 0.31,其中土壤有机质的旋转因子载荷较高,而其含量与翻耕处理无显著差异(ST 19.31 g·kg^{-1} > RT 18.53 g·kg^{-1} > NT 17.37 g·kg^{-1} > CT 16.36 g·kg^{-1});玉米季 F2 因子得分为 – 0.66,其中有机质的旋转因子载荷最高,而其含量亦与翻耕处理无显著差异(ST 18.65 g·kg^{-1} > RT 18.62 g·kg^{-1} > NT 17.31 g·kg^{-1} > CT 16.27 g·kg^{-1})。土壤有机质含量不高是导致免耕处理有机质养分因子得分较低的一个重要原因。目前,免耕土壤有机碳亚表层亏缺现象已被证实[25,35]。本试验免耕秸秆还田处理(NT + r)两季土壤有机质含量均与不还田处理(NT – r)无显著差异,甚至玉米季前者含量小于后者。NT + r 处理大量秸秆碳投入而未使土壤有机碳含量显著增加,除根茬碳对土壤碳固持的贡献大于秸秆碳[36]、秸秆腐解过程中约 2/3 的碳以无机态形式损失外[3],也与土壤中无机营养元素有效性较低有关[37]。免耕土壤质量与传统耕作相比,Franzluebbers[14]用新敏感指标——土壤碳、氮库的层化比

(Stratification ratio)评价土壤质量,结果表明 NT 处理优于 CT 处理。Fuentes 等[21]用多元方差分析及主成分分析法评价土壤质量,结果表明 NT + r 土壤质量最高,CT + r/ - r 次之,NT - r 最低;Govaerts 等[15]也得到类似结果。将各因子得分以该因子特征值的贡献率为权数进行加权求和即得土壤质量的综合得分,本试验 NT 处理两季的综合得分均高于 CT 处理,而 NT + r(小麦季综合得分为 0.14、玉米季为 -0.40)均低于 NT - r(小麦季为 0.50、玉米季为 -0.07)。深松、旋耕有利于土壤结构体保持及碳、氮储量增加[26],两者土壤质量均较高,小麦季综合因子得分 ST(0.25) > RT(0.22),玉米季 ST(0.49) < RT(0.64)。

土壤质量与作物产量呈正相关关系[15,21]。本试验深松处理土壤质量及产量均较高,传统耕作土壤质量最低、生产力却较高,即小麦产量 ST 8 341 kg·hm^{-2} > RT 7 973 kg·hm^{-2} > CT 7 896 kg·hm^{-2} > NT 7 628 kg·hm^{-2}、玉米产量 ST 6 109 kg·hm^{-2} > CT 5 689 kg·hm^{-2} > RT 5 226 kg·hm^{-2} > NT 5 091 kg·hm^{-2},可能是施肥灌水弥补了传统翻耕处理土壤肥力低的缘故。土壤肥力越低,作物产量对施肥灌水的响应越好,而如此高投入获取高产出的做法不利于农业可持续发展。NT + r 处理播种时,秸秆影响农机具的穿透能力、导致播种质量下降,且土壤紧实影响出苗及根系下扎,最终减产[38],而深松是兼顾生态与经济效益的耕作措施[6]。另外,何进等[39]从种子、化肥、农药、人工、机械作业及农业税等农艺成本的角度对不同耕作措施进行经济效益评价,结果表明连年深松覆盖处理两季作物均增收,且每 4 年深松一次不仅不会减产,经济效益还较连年深松有所提高。本试验 ST 处理为连年深松,深松年限对土壤质量的影响尚需进一步研究。

4 结 论

1) 深松、旋耕、翻耕及秸秆还田均能降低土壤容重,免耕土壤容重最大。耕作及秸秆还田对土壤容重的影响依赖于土壤扰动的程度。

2) 深松、旋耕具有一定后效,土壤质量较好;传统翻耕最差,不适宜长期采用。

3) 综合土壤质量、作物产量及经济收益,得出最优耕作还田体系是:小麦季玉米秸秆还田/深松/旋耕/播种(ST + r) - 玉米季小麦秸秆高留茬/免耕/播种,该体系集秸秆覆盖保水培肥效应、深松打破犁底层和旋耕创造良好种床于一体,可显著改善土壤水、肥、气、热环境条件,实现作物高产稳产,适于在该区及同类地区推广。

参 考 文 献:

[1] 中华人民共和国国家统计局.2013 中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2013.

[2] Liu C M, Zhang X Y, Zhang Y Q. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002,111(2):109-120.

[3] Blanco-Canqui H, Lal R. Soil structure and organic carbon relationships following 10 years of wheat straw management in no-till[J]. Soil & Tillage Research, 2007,95(1 - 2):240-254.

[4] Vita P D, Paolo E D, Fecondo G, et al. No-tillage and conventional tillage effects on durum wheat yield, grain quality and soil moisture content in southern italy[J]. Soil & Tillage Research, 2007,92(1 - 2):69-78.

[5] López - Fando C, Dorado J, Pardo M T. Effects of zone-tillage in rotation with no-tillage on soil properties and crop yields in a semi-arid soil from central Spain[J]. Soil & Tillage Research, 2007,95(1 - 2):266-276.

[6] 王 岩,刘玉华,张立峰,等.耕作方式对冀西北栗钙土土壤物理性状及莜麦生长的影响[J].农业工程学报,2014,30(4):109-117.

[7] Díaz - Zorita M, Grove J H. Duration of tillage management affects carbon and phosphorus stratification in phosphatic Paleudalfs[J]. Soil & Tillage Research, 2002,66(2):165-174.

[8] Sá J C M, Lal R. Stratification ratio of soil organic matter pools as an indicator of carbon sequestration in a tillage chronosequence on a Brazilian Oxisol[J]. Soil & Tillage Research, 2009,103(1):46-56.

[9] Mazzoncini M, Sapkota T B, Bùrberi P, et al. Long-term effect of tillage, nitrogen fertilization and cover crops on soil organic carbon and total nitrogen content[J]. Soil & Tillage Research, 2011,114(2):165-174.

[10] Lampurlanés J, Cantero-Martínez C. Hydraulic conductivity, residue cover and soil surface roughness under different tillage systems in semiarid conditions[J]. Soil & Tillage Research, 2006,85(1):13-26.

[11] 李 锦,田霄鸿,王少霞,等.秸秆还田条件下减量施氮对作物产量及土壤碳氮含量的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2014,42(1):137-143.

[12] Turley D B, Phillips M C, Johnson P, et al. Long-term straw management effects on yields of sequential wheat (*Triticum aestivum* L.) crops in clay and silty clay loam soils in England[J]. Soil & Tillage Research, 2003,71(1):59-69.

[13] Karlen D L, Ditzler C A, Andrews S S. Soil quality: why and how [J]. Geoderma, 2003,114(3 - 4):145-156.

[14] Franzluebbers A J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality[J]. Soil & Tillage Research, 2002,66(2):95-

106.

[15] Govaerts B, Sayre K D, Deckers J. A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico[J]. Soil & Tillage Research, 2006,87(2):163-174.

[16] Yemefack M, Jetten V G, Rossiter D G. Developing a minimum data set for characterizing soil dynamics in shifting cultivation systems[J]. Soil & Tillage Research, 2006,86(1):84-98.

[17] Andrews S S, Karlen D L, Mitchell J P. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2002,90(1):25-45.

[18] Shukla M K, Lal R, Ebinger M. Determining soil quality indicators by factor analysis[J]. Soil & Tillage Research, 2006,87(2):194-204.

[19] Zornoza R, Mataix-Solera J, Guerrero C, et al. Evaluation of soil quality using multiple lineal regression based on physical, chemical and biochemical properties[J]. Science of the Total Environment, 2007,378(1 – 2):233-237.

[20] Lu J H, Jiang P P, Wu L S, et al. Assessing soil quality data by positive matrix factorization[J]. Geoderma, 2008,145(3 – 4):259-266.

[21] Fuentes M, Govaerts B, León F D, et al. Fourteen years of applying zero and conventional tillage, crop rotation and residue management systems and its effect on physical and chemical soil quality[J]. European Journal of Agronomy, 2009,30(3):228-237.

[22] Imaz M J, Virto I, Bescansa P, et al. Soil quality indicator response to tillage and residue management on semi-arid Mediterranean cropland[J]. Soil & Tillage Research, 2010,107(1):17-25.

[23] 丁昆仑,Hann M J.耕作措施对土壤特性及作物产量的影响[J].农业工程学报,2000,16(3):28-31.

[24] Birkás M, Jolánkai M, Gyuricza C, et al. Tillage effects on compaction, earthworms and other soil quality indicators in Hungary[J]. Soil & Tillage Research, 2004,78(2):185-196.

[25] 田慎重,宁堂原,王　瑜,等.不同耕作方式和秸秆还田对麦田土壤有机碳含量的影响[J].应用生态学报,2010,21(2):373-378.

[26] 王彩霞,王旭东,朱瑞祥.保护性耕作对土壤结构体碳氮分布的影响[J].自然资源学报,2010,25(3):386-395.

[27] 吴玉红,田霄鸿,南雄雄,等.基于因子和聚类分析的保护性耕作土壤质量评价研究[J].中国生态农业学报,2010,18(2):223-228.

[28] 鲍士旦.土壤农化分析[M].第三版.北京:中国农业出版社,2005.

[29] 徐明岗,于　荣,王伯仁.长期不同施肥下红壤活性有机质与碳库管理指数变化[J].土壤学报,2006,43(5):723-729.

[30] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986.

[31] 克劳斯·巴克豪斯,本德·埃里克森,伍尔夫·普林克,等.多远统计分析方法——用 SPSS 工具[M].上海:格致出版社,上海人民出版社,2009.

[32] Arshad M A, Martin S. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro – ecosystems[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2002,88(2):153-160.

[33] 樊　军,郝明德.黄土高原旱地轮作与施肥长期定位试验研究.Ⅰ.长期轮作与施肥对土壤酶活性的影响[J].植物营养与肥料学报,2003,9(1):9-13.

[34] López – Garrido R, Madejón E, Murillo J M, et al. Soil quality alteration by mouldboard ploughing in a commercial farm devoted to no – tillage under Mediterranean conditions[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2011,140(1 – 2):182-190.

[35] Hou R X, Ouyang Z, Li Y S, et al. Effects of tillage and residue management on soil organic carbon and total nitrogen in the North China Plain[J]. Soil Science Society of America Journal, 2012,76(1):230-240.

[36] Kätterer T, Bolinder M A, Andrén O, et al. Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long-term field experiment[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2011,141(1 – 2):184-192.

[37] Kirkby C A, Richardson A E, Wade L J, et al. Nutrient availability limits carbon sequestration in arable soils[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2014,68:402-409.

[38] 韩　宾,李增嘉,王　芸,等.土壤耕作及秸秆还田对冬小麦生长状况及产量的影响[J].农业工程学报,2007,23(2):48-53.

[39] 何　进,李洪文,高焕文.中国北方保护性耕作条件下深松效应与经济效益研究[J].农业工程学报,2006,22(10):62-67.