

渭北旱塬不同耕作措施对土壤养分分布 及作物产量的影响

杨艳¹, 刘丹¹, 张霞¹, 李忠徽¹, 赵世翔¹, 李军³, 王旭东^{1,2}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院 陕西 杨陵 712100;

2. 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室 西北农林科技大学 陕西 杨陵 712100;

3. 西北农林科技大学农学院 陕西 杨陵 712100)

摘要: 基于8年(2007—2015)定位试验,在小麦—玉米轮作下研究了免耕—深松(NS)、深松—翻耕(SC)、翻耕—免耕(CN)和连年免耕(NN)、深松(SS)、翻耕(CC)等轮耕措施对土壤养分分布及作物产量的影响。结果表明:深松处理(连年深松、免耕—深松)使表层(0~10 cm)土壤与底层(10~20, 20~35, 35~50 cm)土壤有机质、全氮、全磷、速效磷、速效钾等养分含量差异更大,翻耕或免耕的相对差异较小;在0~50 cm的土层中,硝态氮含量在20~35 cm土层相对较高,且以翻耕(CC)处理的含量最高;铵态氮含量在10~20 cm土层相对较高,以免耕—深松(NS)处理的含量最高;连年深松(SS)处理使土壤全钾表层含量较高。免耕—深松(NS)措施在6种耕作措施中小麦和玉米产量均为最高,显著高于翻耕(CC)、免耕(NN)措施。

关键词: 耕作措施; 土壤养分; 小麦; 玉米; 产量; 黑垆土; 渭北旱塬

中图分类号: S157.4+2; S158.3 **文献标志码:** A

Effects of different tillage practices on nutrient distribution in soil profile and crop yield in Weibei Highland

YANG Yan¹, LIU Dan¹, ZHANG Xia¹, LI Zhong-hui¹, ZHAO Shi-xiang¹, LI Jun³, WANG Xu-dong^{1,2}

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Key Laboratory of Plant Nutrition and Agri-Environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The aim of the present study was to investigate the effect of different tillage measures on soil nutrient distribution and crop yield in Weibei Highland. An eight-year(2007—2015) field experiment with six tillage measures under wheat—maize rotation system was conducted. The tillage measures were as follows: no—tillage, subsoiling (NS); subsoiling, conventional tillage (SC); conventional tillage, no—tillage (CN); continuous no—tillage (NN); continuous subsoiling (SS); conventional tillage (CC). The results showed that SS and NS treatments could promote soil total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), available phosphorus (AP) and available potassium (AK) on the surface of soil, which led a significant difference in soil nutrient between the surface soil (0~10 cm) and bottom soil (10~20 cm, 20~35 cm and 35~50 cm). However, CC and NN treatments had no significant effect on soil nutrient movement. For the top 50 cm soil layer, nitric nitrogen ($\text{NO}_3^- - \text{N}$) content at the depth of 20~35 cm was higher than 10~20 cm and 35~50 cm soil layer, and compared with the SC, CN, NN, SS and NS treatments, CC treatment had the highest $\text{NO}_3^- - \text{N}$ content. However, soil ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) content was higher in the 10~20 cm soil layer and the maximum content of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ appeared in the NS treatment. In the SS treatment, had the highest total potassium on the surface of soil. The yield of maize and wheat in the NS treatment was the highest and significant higher than CC and NN treatments.

Keywords: tillage measures; soil nutrient; wheat; maize; yield; dark loessial soil; Weibei Highland

收稿日期: 2016-11-24

修回日期: 2016-12-22

基金项目: 农业部行业专项“旱地合理耕层构建技术指标研究”(201503116)

作者简介: 杨艳(1991—), 女, 天津蓟县人, 硕士, 主要研究方向为土壤化学及土壤肥力。E-mail: 18700942925@163.com。

通信作者: 王旭东(1965—), 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为土壤与环境化学。E-mail: wangxudong01@126.com。

渭北旱塬地处陕西关中平原以北、陕北丘陵沟壑以南,该地区属暖温带易旱区,蒸发量约为 1 832 mm,降水量约为 536 mm^[1],且主要集中在 7—9 月份。该地区分布的农业土壤主要为黑垆土,以种植冬小麦和春玉米为主(目前部分发展为苹果)。由于降水短缺和时空分布不合理制约着该地区冬小麦和春玉米的生长发育^[2-3]。耕作措施对该地区土壤影响巨大,不仅影响土壤的蓄水保墒性、抗侵蚀状况(水蚀、风蚀),而且还影响土壤肥力等。

不同耕作措施对土壤的扰动不同,从而对土壤性质也会产生不同的影响,国内外不同耕作措施对土壤性质影响的研究已有不少报导。徐春阳^[4]等研究发现,长期连年免耕使 0~5 cm 土层有机碳、全氮等含量显著高于翻耕,而在 5~20 cm 土层养分含量显著低于翻耕。有研究^[5]认为,免耕表层土壤速效钾含量高于翻耕,而底层则低于翻耕,但速效磷却在整个耕层内高于翻耕。也有研究表明^[6],深松和免耕对上层土壤的全氮含量以及对土壤底层的有效磷、速效钾含量影响较大。Franzluebber A J^[7]研究连续 7 年的一个对比试验发现,免耕加剧了土壤养分的分层现象。宿庆瑞^[8]研究发现,深松可以改善土壤有机质的含量,还能增加速效磷和钾的含量。Lupwayi^[9]认为,土壤养分的分层在一定程度上会影响作物对其吸收。可见,耕作措施对土壤养分分布的影响至关重要,也影响作物对养分的吸收。

长期的单一耕作会使耕层变浅、土壤压实、犁底层增厚、通透性下降、产量降低等^[10-12]。将免耕、深松、翻耕等进行合理组合与轮换,可以克服单一耕作措施的缺点^[13]。国外土壤的轮耕多是结合轮作系统进行的,国内的土壤轮耕多集中在两熟或南方等地区,但对轮耕引起土壤性质变化的相互比较研究还很少,尤其是对北方地区,原因在于轮耕的试验周期较长,研究难度也较大,涉及到的长期定位试验也很少^[14]。由于所处的地理位置,以往的研究对不同耕作措施下土壤水分变化、抗侵蚀性等方面关注较多^[15-19],而对土壤肥力、养分分布的变化研究相对较少。为此,我们在渭北旱塬的台塬地带(渭南市合阳县)开展了单一耕作(连年免耕、连年深松、连年翻耕)和轮耕(免耕-深松、深松-翻耕、翻耕-免耕轮耕)定位试验,研究不同耕作或轮耕措施对土壤养分分布的影响,为黄土高原黑垆土区的合理耕作和耕层构建提供理论和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地设在陕西省合阳县甘井镇(35°19'N, 110°

05'E),地处渭北旱塬东部的台塬上,属于半湿润易旱区。近 8 年来,该地区平均降水量约 547.2 mm,其中 7—9 月降雨量平均占全年降雨量的 56.9%。土壤为中壤质黑垆土,黄土母质,平均土壤容重为 1.31 g·cm⁻³,多年平均气温在 9℃~13℃,全年无霜期 180~240 d,光热资源丰富。2007 年试验开始前,0~20 cm 土层有机碳、全氮、全磷、全钾含量分别为 4.54、1.30、0.59、5.92 g·kg⁻¹,速效磷、钾含量分别为 3.45、148.4 mg·kg⁻¹。“春玉米-冬闲,冬小麦-夏闲”一年一熟耕作制。

1.2 试验设计

试验从 2007 年开始,前茬作物为玉米。在连续 8 年实行冬小麦-春玉米轮作模式下,将前茬作物全部秸秆粉碎覆盖地表,试验共设置 6 种耕作处理:(1)免耕-深松(NS);(2)深松-翻耕(SC);(3)翻耕-免耕(CN);(4)连年免耕(NN);(5)连年深松(SS);(6)连年翻耕(CC)。其中,免耕(N)是指前茬作物收获后不采取任何的耕作措施,秸秆粉碎覆盖地表;深松(S)是指前茬作物收获后采用深松机每间隔 60 cm 宽度,深松 35 cm,秸秆粉碎覆盖地表;翻耕(C)是指前茬作物收获后翻耕 25 cm,将秸秆粉碎翻入耕层土壤,地表疏松裸露度过休闲期。试验期间耕作方式的位置固定不变。2007—2015 年作物轮作和土壤轮耕顺序见表 1。2014 年小麦收获后,6 种耕作措施(NS、SC、CN、NN、SS、CC)的秸秆还田量分别为 6 906、6 844、5 256、4 766、5 194、5 072 kg·hm⁻²。

玉米季施肥水平为 N 300 kg·hm⁻², P₂O₅ 150 kg·hm⁻², K₂O 150 kg·hm⁻²;小麦季的施肥水平为 N 150 kg·hm⁻², P₂O₅ 120 kg·hm⁻², K₂O 90 kg·hm⁻²,其中氮肥(N)、磷肥(P₂O₅)、钾肥(K₂O)分别为尿素、磷酸二铵、氯化钾。磷钾均以基肥施用,氮素 20% 作为追肥。将肥料混合均匀后撒施于各小区。采用随机区组设计的方法,每个小区的长宽分别为 22.5 m、5 m,面积为 112.5 m²,共设置 3 次重复。供试冬小麦品种为“长 6359”,春玉米品种为“郑单 958”。冬小麦 9 月下旬播种,次年 6 月中旬收获;春玉米 4 月下旬播种,同年 9 月下旬收获。试验期间其它管理同当地大田,无灌溉。

1.3 测定项目和方法

于 2015 年 9 月 20 日春玉米收获后,用土钻分别采集 0~10、10~20、20~35 cm 和 35~50 cm 土层的土壤样品,其中各小区采样时按 S 形路线采集 5 个点组成一个混合样品(每个处理共 3 个混合样),带回实验室后剔除枯枝落叶、根等杂质,过 2 mm 筛后保存一部分于 4℃ 冰箱中,其余自然风干后分别

过 0.25 mm 和 1 mm 筛,用于有机质及养分的测定,测定方法参照《土壤农化分析》^[20]。其中,有机质采用重铬酸钾容量法(外加热法);全氮采用凯氏定氮法;硝铵态氮采用 1 mol·L⁻¹KCl 浸提,用流动分析仪测定;全磷、全钾采用 NaOH 熔融法,其中,全磷用钼锑抗比色法测定,全钾用火焰光度法测定;速效磷用 0.5 mol·L⁻¹NaHCO₃ 浸提,钼锑抗比色法测定;速

效钾采用 1 mol·L⁻¹NH₄OAc 浸提,火焰光度法测定。

1.4 数据处理与统计分析

采用 Microsoft Excel 2007 对数据进行整理并用 Origin 9.0 作图,采用 SAS 8.0 对数据进行单因素方差(ANOVA)分析,用 Duncan 新复极差法(SSR)作多重比较。

表 1 2007—2015 年作物轮作与土壤轮耕次序

Table 1 Sequence of crop rotation and soil rotational tillage systems from 2007 to 2015

耕作措施 Tillage measures	2007—2008 冬小麦 Wheat	2009 春玉米 Maize	2009—2010 冬小麦 Wheat	2011 春玉米 Maize	2011—2012 冬小麦 Wheat	2013 春玉米 Maize	2013—2014 冬小麦 Wheat	2015 春玉米 Maize
NS	N	S	N	S	N	S	N	S
SC	S	C	S	C	S	C	S	C
CN	C	N	C	N	C	N	C	N
NN	N	N	N	N	N	N	N	N
SS	S	S	S	S	S	S	S	S
CC	C	C	C	C	C	C	C	C

注:S为深松耕,N为免耕,C为翻耕;下同。

Note:S: subsoiling; N: no-tillage; C: conventional tillage; the same below.

2 结果与分析

2.1 不同耕作措施下土壤有机质含量及分布变化

由表 2 可知,6 种耕作措施,表层(0~10 cm)土壤有机质含量以 CC 处理的最低,CN、SC、NN 处理与 CC 处理相比差异不显著,但含量高于 CC 处理;SS、NS 处理有机质含量分别比 CC 处理高 9.8%、7.0%,差异达显著水平。在 10~20 cm 土层,SS 处

理的有机质含量最低,NN、CC、CN、SC、NS 处理有机质含量分别比 SS 处理的高 22.3%、21.8%、11.9%、11.8%、7.3%,差异达显著水平。在 20~35 cm 土层,同样是 SS 处理的有机质含量最低,SC 处理与 SS 处理差异不显著,NN、CC、CN、NS 处理显著高于 SS 处理。在 35~50 cm 土层,仍然以 SS 处理的有机质含量最低,有机质含量为 NN>CC>NS>SC>CN>SS。

表 2 不同耕作措施下土壤有机质含量/(g·kg⁻¹)

Table 2 Soil organic matter of different tillage measures

土层深度/cm Soil depth	耕作措施 Tillage measures					
	NS	SC	CN	NN	SS	CC
0~10	16.12±0.48abA	15.27±0.46bcA	15.78±0.47abcA	15.32±0.46bcA	16.54±0.50aA	15.06±0.45cA
10~20	12.05±0.36bB	12.56±0.38bB	12.57±0.38bB	13.730.41±aB	11.23±0.34cB	13.68±0.41aB
20~35	10.49±0.31cC	9.87±0.30dC	12.43±0.37bB	13.19±0.40aB	9.46±0.28dC	13.01±0.39abB
35~50	10.09±0.30cC	9.52±0.29dC	8.90±0.27eC	12.20±0.37aC	8.42±0.25eD	10.66±0.32bC

注:同一行不同小写字母表示差异达到 5% 的显著水平($P<0.05$),同一列不同大写字母表示差异达到 5% 的显著水平($P<0.05$),下同。

Note: different lowercase letters in the same line mean significant difference at $P<0.05$ level; different uppercase letters in the same column mean significant difference at $P<0.05$ level, the same below.

各处理有机质含量均随土层加深而降低,相对而言,在 3 种单一耕作模式中,SS 处理的表层与底层(指 10 cm 以下土层)差异最大。在 3 种轮耕模式中,NS 处理表层与底层的差异大于 SC 或 CN 处理。轮耕(NS、SC、CN)比单一耕作(CC、NN)上下层差异大,但没有 SS 处理的上下层差异大。

2.2 不同耕作措施下土壤养分含量及分布变化

2.2.1 土壤氮素含量及分布

土壤全氮变化(见表 3)显示,表层(0~10 cm)土壤各处理全氮含量差异达到显著水平($P<0.05$),以 CC 处理全氮含量最低,CN、NN 处理与 CC 处理差异不显著,SS、NS、SC 处理的全氮含量分别比 CC 处理显著提高 11.6%、

10.5%、7.0%。在 10~20、20~35、35~50 cm 土层中,均以 SS 处理全氮含量最低,其它各处理全氮含量均显著高于 SS 处理;其中,在 10~20 cm 土层,全氮含量高低顺序为 CN>CC>NN>SC>NS>SS,在 20~35、35~50 cm 土层,全氮含量高低顺序均为 CC>CN>NN>NS>SC>SS。CN、CC 处理的全氮含量

相对较高,SS 处理在 10 cm 以下全氮含量相对最低。各处理全氮含量均随土层加深而降低,与有机质的垂直变化规律基本一致。在 6 种耕作措施中,SS 处理表层与底层差异最大,在 3 种轮耕(NS、SC、CN)模式中,以 NS 处理表层与底层差异最大;轮耕比 NN 或 CC 处理的上下层差异大。

表 3 不同耕作措施下土壤全氮含量/(g·kg⁻¹)
Table 3 Soil total nitrogen of different tillage measures

土层深度/cm Soil depth	耕作措施 Tillage measures					
	NS	SC	CN	NN	SS	CC
0~10	0.95±0.03aA	0.92±0.03abA	0.91±0.03abcA	0.90±0.03bcA	0.96±0.03aA	0.86±0.03cA
10~20	0.76±0.02bB	0.80±0.02aB	0.82±0.02aB	0.81±0.02aB	0.65±0.02cB	0.82±0.02aAB
20~35	0.74±0.02aB	0.69±0.02cC	0.79±0.02aB	0.77±0.02abB	0.60±0.02dC	0.81±0.02aB
35~50	0.65±0.02cC	0.65±0.02cC	0.73±0.02abC	0.70±0.02bC	0.59±0.02dC	0.74±0.02aC

土壤硝态氮变化(见图 1)显示,不同耕作措施显著影响 0~50 cm 土层硝态氮的分布状况。6 种耕作措施(除 NN 处理外)的硝态氮含量均在 20~35 cm 土层间有明显的累积峰,这主要与当年的降雨有关,由图 2 可以看出,2015 年的降雨主要在 6 月份,并且在作物收获前的 7—9 月份的降雨并不高,从而导致硝态氮主要在该层累积。其中以 CC 处理在 20~35 cm 土层含量最高,NS、CN、SS 处理的硝态氮含量居中,NN、SC 处理的硝态氮含量相对较低。在 0~10 cm 土层,硝态氮含量由高到低依次为 CN>CC>NN>SS>NS>SC,且处理间差异达到了显著性($P<0.05$)。在 10~20 cm 土层,硝态氮含量由高到低依次为 NN>CC>NS>SC>CN>SS,NS 与 SC 处理差异不显著,其它各处理差异达显著水平。在 35~50 cm 土层,各处理硝态氮含量高低顺序为 NN>CC>CN>NS>SC>SS,其中 NS、CN、CC 处理间差异不显著,其它 3 个处理(3 者之间差异性显著)硝态氮含量显著高于前三者。

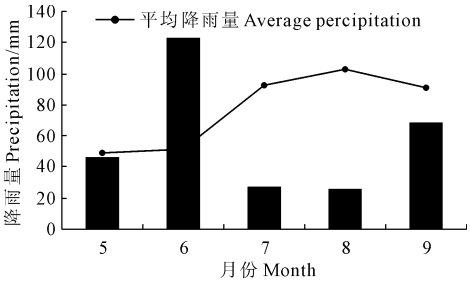


图 2 2015 年 5—9 月份降雨量与 2007—2015 年 5—9 月份的平均降雨量

Fig.2 The precipitation in 2015 between 5 and 9 month and the average precipitation from 2007 to 2015 between 5 and 9 month

土壤铵态氮变化(见表 4)显示,表层(0~10 cm)土壤 CC 处理的铵态氮含量最低,SS 处理与 CC 处理差异不显著,SC、NS、CN、NN 处理分别较 CC 处理高 136.8%、64.0%、51.8%、36.0%,差异达显著水平。在 10~20 cm 土层,SC 处理铵态氮含量最低,CN 处理与 SC 处理差异不显著,NS、CC、SS、NN 处理显著高于 SC 处理,分别高 57.7%、50.6%、39.1%、37.8%。在 20~35 cm 土层,CN 处理铵态氮含量最低,其它处理均显著高于 CN 处理,大小顺序为 NS>NN>CC>SS>SC>CN。相比较而言,NS 处理的铵态氮含量较高。在 35~50 cm 土层,处理间铵态氮含量差异不显著。土壤上下层比较发现,多数处理土壤铵态氮在 10~20 cm 土层较高(SC 除外),然后随着土壤深度的加深而呈波动性变化。

2.2.2 土壤磷素含量及分布 由表 5 可知,不同耕作处理土壤表层(0~10 cm)全磷含量差异不显著。在 10~20 cm 土层,以 CN 处理的全磷含量最低,NS、SC、SS 处理与 CN 处理差异不显著,CC、NN 处理显

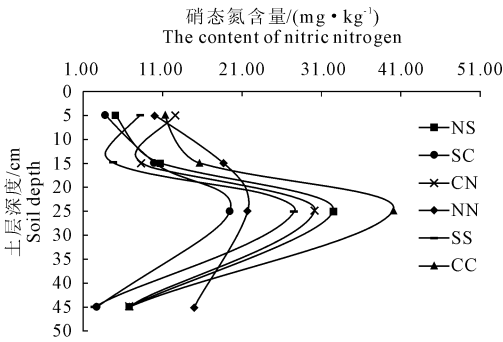


图 1 不同耕作措施对土壤硝态氮含量的影响
Fig.1 Effect of different tillage measures on nitric nitrogen

著高于 CN 处理(分别高 36.2%、27.7%)。在 20 ~ 35、35 ~ 50 cm 土层,均是 NS 处理全磷最低,其它处理均显著高于 NS 处理,全磷含量大小顺序为 CC > NN > SS > SC > CN > NS(在 35 ~ 50 cm 土层,除 NN 与 CC 处理有变动外)。6 种耕作的全磷含量均随土层加深而降低,表层全磷含量显著高于底层(除 CC 处

理外)。在 3 种单一耕作(NN、SS、CC)中,SS 处理表层与底层差异最大。在 3 种轮耕模式中,以 NS 处理表层与底层差异最大。轮耕比 NN 或 CC 处理的上下层差异大。相比较而言,CC 处理在 0 ~ 35 cm 土层全磷分布较均匀,这可能与翻耕使土壤与肥料混合均匀有关。

表 4 不同耕作措施下土壤铵态氮含量/(mg·kg⁻¹)
Table 4 Soil ammonium nitrogen of different tillage measures

土层深度/cm Soil depth	耕作措施 Tillage measures					
	NS	SC	CN	NN	SS	CC
0 ~ 10	1.87 ± 0.06bB	2.70 ± 0.08aA	1.73 ± 0.05bcA	1.55 ± 0.05bcB	1.35 ± 0.04cdA	1.14 ± 0.03dA
10 ~ 20	2.46 ± 0.06aA	1.56 ± 0.05cB	1.80 ± 0.05cA	2.15 ± 0.05bA	2.17 ± 0.06abA	2.35 ± 0.07abA
20 ~ 35	2.13 ± 0.06aAB	1.47 ± 0.04bB	0.93 ± 0.03cB	1.82 ± 0.04abAB	1.51 ± 0.03bA	1.61 ± 0.03bA
35 ~ 50	1.19 ± 0.04aC	1.53 ± 0.04aB	1.38 ± 0.04aA	2.16 ± 0.05aA	1.51 ± 0.05aA	2.00 ± 0.06aA

表 5 不同耕作措施下土壤全磷含量/(g·kg⁻¹)
Table 5 Soil total phosphorus of different tillage measures

土层深度/cm Soil depth	耕作措施 Tillage measures					
	NS	SC	CN	NN	SS	CC
0 ~ 10	0.73 ± 0.02aA	0.67 ± 0.02aA	0.76 ± 0.04aA	0.75 ± 0.05aA	0.73 ± 0.03aA	0.72 ± 0.10aA
10 ~ 20	0.49 ± 0.02bB	0.53 ± 0.02bB	0.47 ± 0.02bB	0.60 ± 0.03aB	0.53 ± 0.04bB	0.64 ± 0.02aA
20 ~ 35	0.23 ± 0.03dC	0.35 ± 0.01cC	0.31 ± 0.01cC	0.49 ± 0.02bC	0.45 ± 0.02bC	0.57 ± 0.05aA
35 ~ 50	0.16 ± 0.03dD	0.29 ± 0.01cD	0.34 ± 0.04cC	0.50 ± 0.02aC	0.30 ± 0.01cD	0.41 ± 0.01bB

土壤速效磷变化(见表 6)显示,不同耕作处理表层(0 ~ 10 cm)土壤以 CN 处理的速效磷含量最低,CC 处理与 CN 处理差异不显著,NS、SC、NN、SS 处理显著高于 CN 处理。在 10 ~ 20 cm 土层,NS 处理速效磷含量最低,SC、CN 处理与 NS 处理差异不显著,而 CC、NN、SS 处理比 NS 处理分别高 270.2%、192.9%、78.7%,差异显著。在 20 ~ 35、35 ~ 50 cm 土层,均是 SC 处理速效磷含量最低,NS 处理与 SC

处理差异不显著,其它处理显著高于 SC 处理,其中在 20 ~ 35 cm 土层,速效磷含量大小顺序为 NN > CC > CN > SS > NS > SC,35 ~ 50 cm 土层,除 SS 处理与 CN 处理顺序有变动外,速效磷含量大小顺序与 20 ~ 35 cm 相同。不同耕作处理土壤速效磷均随土层加深而降低,表层速效磷含量显著高于底层。单一耕作中 SS 处理表层与底层差异最大。3 种轮耕模式中,同样还是 NS 处理表层与底层差异最大。

表 6 不同耕作措施下土壤速效磷含量/(mg·kg⁻¹)
Table 6 Soil available phosphorus of different tillage measures

土层深度/cm Soil depth	耕作措施 Tillage measures					
	NS	SC	CN	NN	SS	CC
0 ~ 10	13.79 ± 0.71aA	12.25 ± 0.14bA	10.24 ± 0.07eA	11.97 ± 0.34bcA	11.23 ± 0.41cdA	10.90 ± 0.07deA
10 ~ 20	2.25 ± 0.50dB	2.85 ± 0.21cdB	3.30 ± 0.28cdB	6.59 ± 0.55bB	4.02 ± 1.03cB	8.33 ± 0.01aB
20 ~ 35	1.81 ± 0.01cdB	1.45 ± 0.07dC	3.64 ± 1.03bB	6.41 ± 0.28aB	3.15 ± 0.76bcB	6.31 ± 0.28aC
35 ~ 50	1.31 ± 0.01dB	1.26 ± 0.07dC	2.74 ± 0.97cB	6.94 ± 0.34aB	3.07 ± 0.35cB	4.34 ± 0.35bD

2.2.2.3 土壤钾素含量及分布 由表 7 可以看出,表层(0 ~ 10 cm)土壤全钾含量除了 SS 处理显著高于 NN 处理外,其它处理间差异不显著。在 10 ~ 20 cm 土层,SS 处理全钾含量最低,其它处理均显著高于

SS 处理,全钾含量高低顺序为 CC > NN > SC > NS > SC > SS。在 20 ~ 35 cm 土层,同样是 SS 处理全钾含量最低,其中 CN、CC 处理与 SS 处理差异不显著,NS、SC、NN 处理显著高于 SS 处理。在 35 ~ 50 cm 土

层,CN 处理全钾含量最低,其它处理均显著高于 CN 处理,全钾含量高低顺序为 NN>NS>SC>SS>CC>CN。6 种耕作模式中 SS 处理的全钾含量在表层较

高,这可能与深松处理下作物长势好导致秸秆还田量大有关。

表 7 不同耕作措施下土壤全钾含量/(g·kg⁻¹)
Table 7 Soil total potassium of different tillage

土层深度/cm Soil depth	耕作措施 Tillage measures					
	NS	SC	CN	NN	SS	CC
0~10	16.73±0.25bC	16.53±0.24bB	16.81±0.05bA	15.94±0.05bC	19.29±0.45aA	16.80±0.78bB
10~20	16.40±0.26cC	16.76±0.09cB	16.25±0.48cA	18.76±0.36bA	15.46±0.14dD	20.09±0.11aA
20~35	17.68±0.14aB	17.61±0.30abAB	16.85±0.07bcA	17.62±0.07abB	16.68±0.23cC	17.07±0.66abcB
35~50	18.55±0.06aA	18.32±0.24aA	16.52±0.26bA	18.75±0.16aA	18.05±0.23aB	17.97±0.01aB

从土壤速效钾含量(见表 8)可以看出,表层(0~10 cm),CC 处理的速效钾含量最低,NN、CN、SS、SC、NS 处理均显著高于 CC 处理(分别高 45.2%、40.9%、30.1%、26.8%、25.2%)。在 10~20 cm 土层,SS 处理速效钾含量最低,其中 NS 处理与 SS 处理差异不显著,NN、CC、SC、CN 处理显著高于 SS 处理,分别高 38.1%、26.0%、23.6%、14.3%。在 20~35 cm 土层,同样是 SS 处理速效钾含量最低,其它处

理均显著高于 SS 处理,大小顺序为 NN>CC>NS>SC>CN>SS。在 35~50 cm 土层,虽然以 SS 处理速效钾含量最低,但多数处理与 SS 处理差异未达到显著性水平(NS 处理除外)。6 个处理的速效钾含量随土层加深而降低,表层速效钾含量显著高于底层,单一耕作中 SS 处理表层与底层差异最大。3 种轮耕模式中,CN 处理表层与底层差异最大。轮耕比 NN 或 CC 处理的上下层差异大。

表 8 不同耕作措施下土壤速效钾含量/(mg·kg⁻¹)
Table 8 Soil available potassium of different tillage

土层深度/cm Soil depth	耕作措施 Tillage measures					
	NS	SC	CN	NN	SS	CC
0~10	211.54±1.44bA	214.28±1.67bA	238.03±4.28aA	245.32±2.80aA	219.74±12.41bA	168.95±1.58cA
10~20	105.27±3.06cdC	121.36±3.76bB	112.22±0.01cB	137.57±0.43aB	98.17±4.20dB	123.66±3.29bB
20~35	115.07±1.27bcBC	109.66±2.60cdC	106.88±0.02dC	129.48±2.04aB	94.73±4.28cB	120.58±1.68bB
35~50	132.85±18.66aB	112.12±0.77bC	102.79±0.10bC	117.64±5.51abC	100.22±3.50bB	108.49±6.40bC

2.3 不同耕作处理对作物产量的影响

由表 9 可知,不同耕作措施的冬小麦与玉米产量均达到了显著性差异。8 年的冬小麦产量表现为 NS>SC>CN>SS>CC>NN,其中 NS 和 SC 轮耕处理显著高于其它 4 种耕作方式($P<0.05$)。6 种耕作方式之间玉米产量表现为 NS>SC>CN>SS>NN>CC,3 种轮耕方式与连年免耕(NN)和翻耕(CC)相比较,达到显著差异水平($P<0.05$),轮耕之间差异不显著;单一耕作间的春玉米产量差异也不显著。由表 9 还可以看出,免耕(NN)处理与翻耕(CC)处理相比,其小麦产量降低,而玉米产量虽有所提高,但差异不显著。

3 讨论与结论

不同耕作措施对土壤产生的物理扰动不同,从而 影响土壤有机质矿化以及水分、养分运动,进而影

表 9 2007—2015 年不同耕作下冬小麦和春玉米的平均产量/(kg·hm⁻²)

Table 9 Average yield of winter wheat and spring maize of different tillage from 2007 to 2015

处理 Treatment	冬小麦 Wheat	春玉米 Maize
NS	6466a	8360a
SC	6275a	8085a
CN	5403b	7699a
NN	4459c	6475b
SS	5339b	7667ab
CC	4811bc	6417b

响土壤养分的分布^[21-23]。不同耕作措施的有机质含量均随土层加深而呈逐渐降低的趋势,这与陈孙华^[24]等研究相同。有研究认为,免耕能够显著提高表层土壤有机质含量^[25],本研究的结果与其稍有不同。而王碧胜^[26]等研究提出,在表土层,免耕模式

有机质含量较传统耕作虽有所提高,但差异并不显著,本研究结果与其一致。本研究发现,与翻耕(CC)处理相比,免耕(NN)处理在0~10 cm表层增加了有机质含量,但未达到显著水平,这可能与长期免耕下作物产量有所减低(表9),秸秆还田量($4\ 766\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)相应减少有关(该试验小麦籽粒与秸秆的比值为1:1.1,玉米的比值为1:1.2);在西北半湿润易旱条件下,农作物秸秆在表层土壤中的矿化率高达80%左右^[27]。而在底层(10~20、20~35、35~50 cm)土壤中,免耕处理的有机质又趋于最高,这与免耕对土壤扰动小,有利于有机质的保存有关^[28~29]。深松(SS)处理的表层(0~10 cm)土壤有机质含量高,且与底层(10~20、20~35、35~50 cm)差异大,这与深松后作物长势好、秸秆还田量较大($5\ 194\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)有关。另外,深松引起底层土壤通气性改善,促进底层有机质的矿化,从而导致表层与底层的差异大。翻耕(CC)使整个土层(0~50 cm)有机质含量分布相对比较均匀,这与该耕作引起上下层土壤每年换位有关。

不同耕作处理下,全氮的分布规律与有机质大致相似,也随土层加深逐渐减少,同样也以深松(SS)处理的土壤全氮上下层差异最大。这与深松条件下促进了底层土壤有机氮的矿化,提高了玉米对氮素的吸收有关^[30]。不同处理土壤硝态氮普遍在20~35 cm土层相对较高,这是由作物吸收及随土壤水分向下淋溶共同所致。由于玉米生育的中后期(8—9月份)当地雨量相对较高,从而引起硝态氮向下移动。相比较而言,翻耕(CC)处理硝态氮在该土层含量最高,原因在于翻耕创造了良好的通气状况,有利于硝化作用发生,对土壤中氮素转化为硝态氮有促进作用^[31]。铵态氮含量普遍在10~20 cm土层高于表层(0~10 cm),这与北方石灰性土壤pH值较高,表层土壤氨挥发多有关^[32]。

6种耕作措施下,在0~50 cm土层全磷均以表层最高,其原因是该地区磷肥施用多撒施于地表,磷被土壤固定所致。10 cm以下层次的土壤,翻耕(CC)、免耕(NN)处理的全磷含量较三种轮耕措施(NS、SC、CN)高,这与翻耕使上下土层土壤发生置换有关;免耕条件下可能是由于秸秆粉碎覆盖在地表,在覆盖条件下,一般土温会较低,而当土壤温度低于作物生长发育的适宜温度(玉米在10℃)时磷的吸收将会受到阻碍,即对磷吸收减少^[33]。不同耕作措施间速效磷含量趋势与土壤全磷趋于一致,免耕、翻耕处理底层土壤速效磷在作物收获时含量高,也进一步说明了二者对磷素的吸收减少。

土壤全钾含量总体来看处理间差异较小,只有SS处理相对而言表层含量较高,这与该处理秸秆还田量相对较大^[34],从而较多地补充了土壤中被植物带走的钾素有关^[12]。深松(SS)处理速效钾含量低,也进一步证实了作物对钾素吸收多,通过秸秆还田是引起该处理上下土层钾素存在差异的主要原因。深松打破犁底层有利于保水,有利于作物根系的生长,从而提高作物产量^[35],本试验的结果也发现,深松与免耕、深松与翻耕进行轮耕,小麦和玉米的产量均相对较高。相对于翻耕(CC),长期免耕(NN)处理下的小麦产量、玉米产量并未显著提高,甚至出现减产现象,这与一些研究结果不同^[36],试验区的黑垆土属于偏黏的土壤质地类型,其矿物以伊利石为主,易发生板结。长期免耕不扰动土壤,导致耕层变浅,植物根系分布较浅^[37],不利于对养分的吸收(免耕处理下底层各养分含量均比较高),从而导致产量不增加或降低。其原因还需要进一步深入研究。

在渭北高原黑垆土地地区,通过8年的长期耕作定位试验,结果表明:不同耕作措施影响着该地区土壤的养分分布和作物产量。相比翻耕(CC)处理,深松(SS)、深松+免耕(NS)处理均能显著提高表层(0~10 cm)有机质含量,其中深松处理引起表层与底层有机质的差异大于免耕(NN)或翻耕(CC),而轮耕(NS、SC、CN)对上下层有机质有一定的调节作用;深松(SS)引起多数养分上下层差异比较大,轮耕(NS、SC、CN)对养分分布的影响小于深松(SS),但大于免耕(NN)或翻耕(CC);长期免耕并没有显著增加作物产量,甚至产量有一定程度降低;而深松与免耕、深松与传统耕作相结合进行轮耕,可以获得较高的玉米或小麦产量,是该地区较适宜的耕作模式,但不同的耕作模式对土壤物理、化学、生物学性状以及水分等方面的影响还需要进一步深入研究。

致谢:感谢西北农林科技大学农学院李军教授及其团队提供的田间试验和部分数据材料。

参 考 文 献:

- [1] 司政邦,李 军,周婷婷.耕作与施肥模式对渭北旱塬春玉米土壤肥力和产量的影响[J].西北农业学报,2016,25(1):25-33.
- [2] 柏炜霞.渭北旱塬小麦玉米轮作制保护性耕作与轮耕效应研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2014:9-10.
- [3] 李 龙,郝明德,王继军,等.渭北旱塬保护性耕作对春玉米产量及水分利用效率的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2014,42(12):46-52.
- [4] 徐阳春,沈其荣,雷宝坤,等.水旱轮作下长期免耕和施用有机肥对土壤某些肥力性状的影响[J].应用生态学报,2000,11(4):549-552.

- [5] 冯跃华,邹应斌,王淑红,等.免耕对土壤理化性状和直播稻生长及产量形成的影响[J].作物研究,2004,18(3):137-140.
- [6] 李友军,黄明,吴金芝,等.不同耕作方式对豫西旱区坡耕地水肥利用与流失的影响[J].水土保持学报,2006,20(2):42-45.
- [7] Franzluebbers A J, Schomberg H H, Endale D M. Surface-soil responses to paraplowing of long-term no-tillage cropland in the Southern Piedmont USA[J]. Soil & Tillage Research, 2007,96(1-2):303-315.
- [8] 宿庆瑞,迟凤琴,张久明,等.不同耕作技术模式对土壤理化性状及大豆产量的影响[J].大豆科学,2010,29(3):453-456.
- [9] Lupwayi N Z, Clayton G W, O'Donovan J T, et al. Soil nutrient stratification and uptake by wheat after seven years of conventional and zero tillage in the Northern Grain belt of Canada[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2006,86(5):767-778.
- [10] 郭新荣.土壤深松技术的应用研究[J].山西农业大学学报(自然科学版),2005,25(1):74-77.
- [11] 赵洪利,李军,贾志宽,等.不同耕作方式对黄土高原旱地麦田土壤物理性状的影响[J].干旱地区农业研究,2009,27(3):17-21.
- [12] 李亭亭.不同耕作及秸秆还田方式对春玉米产量形成及养分吸收的影响[D].沈阳:沈阳农业大学,2013:6-7.
- [13] 李娟,李军,尚金霞,等.轮耕对渭北旱塬春玉米田土壤理化性状和产量的影响[J].中国生态农业学报,2012,20(7):867-873.
- [14] 张海林,秦耀东,朱文珊.耕作措施对土壤物理性状的影响[J].土壤,2003,35(2):140-144.
- [15] 陈辉林,田霄鸿,王晓峰,等.不同栽培模式对渭北旱塬区冬小麦生长期土壤水分、温度及产量的影响[J].生态学报,2010,30(9):2424-2433.
- [16] 柏炜霞,李军,王玉玲,等.渭北旱塬小麦玉米轮作区不同耕作方式对土壤水分和作物产量的影响[J].中国农业科学,2014,47(5):880-894.
- [17] Yang H S, Feng J X, Zhai S L, et al. Long-term ditch-buried straw return alters soil water potential, temperature, and microbial communities in a rice - wheat rotation system[J]. Soil and Tillage Research, 2016,163:21-31.
- [18] 成婧,吴发启,王健,等.渭北旱塬不同程度土壤侵蚀及生产力恢复试验[J].中国水土保持科学,2013,11(2):19-24.
- [19] Deyanira L, Zenaida L, Fernando D. Water erosion risk assessment and impact on productivity of a Venezuelan soil[J]. CATENA, 2005,(2-3):297-306.
- [20] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000:25-106.
- [21] 李秀双,师江澜,王淑娟,等.长期秸秆还田对农田土壤钾素形态及空间分布的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44(3):109-117.
- [22] Karlen D L, Berry E C, Colvin T S, et al. Twelve-year tillage and crop rotation effects on yields and soil chemical properties in northeast Iowa[J]. Communications in Soil Science & Plant Analysis, 1991,22(19):1985-2003.
- [23] 马林,孟凡德,石书兵,等.不同耕作方式下土壤肥力的动态变化[J].甘肃农业大学学报,2008,43(2):100-104.
- [24] 陈孙华.衡阳紫色土丘陵坡地不同恢复阶段土壤理化特征[J].水土保持研究,2013,20(1):57-60.
- [25] 姜学兵,李运生,欧阳竹,等.免耕对土壤团聚体特征以及有机碳储量的影响[J].中国生态农业学报,2012,20(3):270-278.
- [26] 王碧胜,蔡典雄,武雪萍,等.长期保护性耕作对土壤有机碳和玉米产量及水分利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(6):1455-1464.
- [27] 王旭东,陈鲜妮,王彩霞,等.农田不同肥力条件下玉米秸秆腐解效果[J].农业工程学报,2009,25(10):252-257.
- [28] Balesdent J, Mariotti A, Boisgontier D. Effect of tillage on soil organic carbon mineralization estimated from ^{13}C abundance in maize fields[J]. Journal of Soil Science, 1991,41(4):587-596.
- [29] 武际,郭熙盛,张祥明,等.麦稻轮作下耕作模式对土壤理化性质和作物产量的影响[J].农业工程学报,2012,28(3):87-93.
- [30] 张总正,秦淑俊,李娜,等.深松和施氮对夏玉米产量及氮素吸收利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2013,19(4):790-798.
- [31] 胡立峰,胡春胜,安忠民,等.不同土壤耕作法对作物产量及土壤硝态氮淋失的影响[J].水土保持学报,2005,19(6):186-189.
- [32] 杨杉,吴胜军,王雨,等.三峡库区农田氮挥发及其消减措施研究进展[J].土壤,2014,46(5):773-779.
- [33] 李新举,赵美兰.免耕对土壤养分的影响[J].土壤通报,2000,31(6):267-269.
- [34] 徐永刚,马强,周桦,等.秸秆还田与深松对土壤理化性状和玉米产量的影响[J].土壤通报,2015,36(2):428-432.
- [35] 梁金凤,齐庆振,贾小红,等.不同耕作方式对土壤性质与玉米生长的影响研究[J].生态环境学报,2010,19(4):945-950.
- [36] 王碧胜,蔡典雄,武雪萍,等.长期保护性耕作对土壤有机碳和玉米产量及水分利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(6):1455-1464.
- [37] 何淑勤,郑子成,李廷轩,等.水旱轮作条件下免耕土壤有机碳变化特征研究[J].水土保持通报,2012,32(1):1-4.