

何亚男,丁 亨,周正霄,等. 小麦/苜蓿间套种植对土壤养分的影响[J]. 江苏农业科学,2017,45(15):64-68.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.15.016

# 小麦/苜蓿间套种植对土壤养分的影响

何亚男<sup>1</sup>, 丁 亨<sup>2</sup>, 周正霄<sup>2</sup>, 张晓红<sup>1</sup>

(1. 山西师范大学地理科学学院, 山西临汾 041000; 2. 山西省临汾市气象局, 山西临汾 041000)

**摘要:**采用大田试验的方法,测定了小麦、苜蓿单播与小麦/苜蓿间套种植 3 种处理方式下土壤有机质、pH 值和氮、磷、钾养分的 2 m 深度的分层含量及剖面分布特征。各处理土壤有机质剖面分布均呈“S”形,表层 0~20 cm 土壤有机质含量 XD(20 g/kg)略高于其他 2 个处理,0~60 cm 土壤有机质含量 XD>XMT>MD,而深层 XMT 有机质含量却超过了 XD(60~100 cm)和 MD(150~200 cm),而这可能是小麦与苜蓿间套后进一步促进了深根作物苜蓿深层根系向下分布的有力说明。土壤 pH 值随深度而增加,通体呈碱性,处理间无显著差异。表层 0~20 cm 各处理全氮含量间没有显著差异,20~60 cm 土层深度内 MD 和 XMT 全氮含量极显著高于 XD;底层 XD 速效氮含量占比达全剖面的 1/4。小麦套种苜蓿不仅有利于提高 20~150 cm 深度土壤氮素肥力,同时还可在底层使常规麦田深层土壤氮素流失问题得以减免。经过 1 个麦季的消耗,XMT 和 XD 处理表层土壤速效磷含量接近 10 mg/kg,MD 只有 6.421 0 mg/kg,无论是对小麦来说还是对苜蓿来说都表现为缺磷状态,说明在这 3 种处理模式生产实践中磷肥的使用都具有必要性和增产的巨大可能性。小麦/苜蓿间套体系中会使全剖面土壤钾素的消耗比例得以优化,故可以少施甚至不施钾肥。

**关键词:**小麦;苜蓿;间套种;土壤养分

**中图分类号:** S512.104.7;S158.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-1302(2017)15-0064-05

素有“牧草之王”的紫花苜蓿在改善农作物茬口,病虫害的克制<sup>[1]</sup>,改善土壤物理性状,提高土壤保水、保肥及供肥能力<sup>[2-3]</sup>,保护生态环境,提供优质牧草<sup>[4-7]</sup>,促进农畜和谐发展方面发挥着重大作用,因此将苜蓿与冬小麦套种,将有利于

缓解粮草争田,促成农畜双赢,具有十分远大的前景<sup>[8]</sup>。我国曾有过小麦间套作苜蓿获得显著经济效益的研究报道<sup>[9-10]</sup>;马克争在小麦苜蓿间套种研究中的结果也表明小麦-苜蓿间作通过优化卵形异绒螨、瓢虫和寄生蜂共同组成的天敌组合提高了对小麦主要害虫麦长管蚜的控制效果,从而显著提高了小麦产量<sup>[11]</sup>。张晓斌等通过小麦/苜蓿套作生物盆栽试验研究了植物修复 PAHs 污染土壤的效果、修复风险评估与修复后土壤的农业利用<sup>[12]</sup>,但是目前我国乃至世界范围内对于小麦间套苜蓿的研究还是很少,而且主要侧重于间套种作物的产量、经济效益和植物修复分析<sup>[13-15]</sup>,而对间

收稿日期:2016-05-06

基金项目:山西师范大学自然科学基金(编号:2011ZR1117)。

作者简介:何亚男(1990—),女,山西太原人,硕士研究生,主要从事农业生态和土壤学研究。E-mail:1097805959@qq.com。

通信作者:张晓红,博士,副教授,主要从事农业生态和土壤学研究。

E-mail:13663473442@163.com。

- [13] Dao P T, Ram H H. Genetics of seed longevity in soybean[J]. Soybean Science, 1999, 18(4): 312-317.
- [14] Modarresi R, Rucker M, Tekrony D M. Accelerated aging test for comparing wheat seed vigour[J]. Seed Science and Technology, 2002, 30(3): 683-687.
- [15] Delouche J C, Baskin C C. Accelerated ageing techniques for predicting the relative storability of seed lots[J]. Seed Science and Technology, 1973, 1(2): 427-452.
- [16] Basra S M A, Ahmad N, Khan M M, et al. Assessment of cottonseed deterioration during accelerated ageing[J]. Seed Science and Technology, 2003, 31(3): 531-540.
- [17] Machado N B, Custodio C C, Takaki M. Evaluation of naturally and artificially aged seed of *Phaseolus vulgaris* L. [J]. Seed Science and Technology, 2001, 29(1): 137-149.
- [18] 那平山, 张国盛. 不同贮藏年份羊柴种子生活力和活力的研究[J]. 中国草地, 1993(5): 52-55.
- [19] 陈士林. 玉米种子活力与田间苗期性状相关性研究[J]. 种子, 2003(4): 35-37.
- [20] 颜启传. 种子学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.

- [21] 佟汉文, 刘易科, 朱展望, 等. 基因型和环境对小麦种子活力的影响[J]. 麦类作物学报, 2012, 32(6): 1167-1170.
- [22] 王 颖, 马华锋, 陈英侠, 等. 玉米种子发芽率、种子活力与田间出苗率之间的关系[J]. 农业科技通讯, 2009(9): 109-110.
- [23] 唐 强, 宋自力, 徐 雯. 枫杨种子活力测定方法研究[J]. 湖南林业科技, 2011, 38(2): 14-16.
- [24] 张文明, 郑文寅, 姚大年, 等. 草坪草种子活力测定方法的比较研究[J]. 草原与草坪, 2004, 106(3): 48-51.
- [25] 王 仲, 许文娟, 曹 萍. 甜玉米种子活力与田间出苗率的灰色关联度分析[J]. 种子, 2005, 24(3): 52-53.
- [26] 张文明, 郑文寅, 任 冲, 等. 电导法测定大豆种子活力的初步研究[J]. 种子, 2003(2): 34-36.
- [27] 李永刚, 王正旭, 杨民峰, 等. 电导率法测定烟草种子发芽率的研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(34): 15052-15058.
- [28] 石海春, 柯永培, 刘应洪, 等. 电导率法测定玉米种子活力的优化条件[J]. 种子, 2008, 27(5): 7-10.
- [29] 梅鸿献, 刘艳阳, 武 轲, 等. 芝麻种子老化处理生理特性变化及种子活力适宜检测方法研究[J]. 华北农学报, 2013, 28(5): 169-174.

套种过程中对土壤养分的研究更是少见。本研究在以小麦种植为主的山西省临汾市尧都区进行的小麦与苜蓿间套种植大田实验基础上,系统探讨大田生产条件下小麦间套苜蓿对主要土壤养分产生的影响,以期能够对小麦间套苜蓿的种植技术进步和推广提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验区位于山西省临汾市尧都区东杜村,地处  $35^{\circ}55'N$ 、 $111^{\circ}34'E$ ,海拔 484 m,属暖温带大陆性半干旱季风气候,年均降水量 550 mm,平均气温  $9 \sim 13^{\circ}C$ ,无霜期约 203 d,属于旱作农业区。土壤类型为褐土。试验田土壤基本性质为:pH 值 8.05,有机质含量 21.51 g/kg,全氮含量 1.18 g/kg,全磷含量 0.60 g/kg,全钾含量 20.85 g/kg,碱解氮含量 53.82 mg/kg,有效磷含量 10.59 mg/kg 和速效钾含量 235.55 mg/kg(基本土样取于 2014 年秋小麦播种之前)。

### 1.2 试验材料与试验设计

试验种植小麦品种为晋麦 95,苜蓿为当地品种,均在县底镇种子分公司购买。其中苜蓿千粒质量 2.255 g,发芽率 75%;晋麦 95 为半冬性品种,千粒质量 40 g,发芽率 65%。

田间试验设小麦单播(XD)、苜蓿单播(MD)和小麦/苜蓿间套种(XMT)3个处理,各3次重复,共9个试验小区,小区面积  $50 m^2$ ,随机排列。苜蓿于 2014 年 4 月份种植,南北方向条播,行距 40 cm,播种量  $18 kg/hm^2$ ;冬小麦于 9 月下旬在已建植苜蓿地上同向机械条播,行距 18 cm,播种量  $225 kg/hm^2$ ,并于秋季小麦播种前地面撒播形式统一施用复合肥(用量  $N 187.5 kg/hm^2$ ,  $P_2O_5 97.5 kg/hm^2$ ,  $K_2O 52.5 kg/hm^2$ );春季小麦起身期地表撒施追肥( $N 225 kg/hm^2$ ,  $K_2O 37.5 kg/hm^2$ )后人工松土覆盖。

### 1.3 土壤样品采集与测定

1.3.1 土壤样品采集 2015 年 6 月上旬小麦收获后在各试验小区内,“S”形布点,用土钻分取 5 钻点 0~20、20~60、60~100、100~150、150~200 cm 共 5 个层次的土壤样品,分层充分混合后四分之一法留样。采集的样品置于室内自然风

干,剔除大石块、植物根系等杂质,磨碎分别过 20 目和 60 目尼龙筛,装袋密封用于土壤全量和速效养分等的分析测定。

1.3.2 土壤养分测定方法<sup>[16]</sup> 土壤有机质:油浴加热重铬酸钾氧化-容量法;土壤全氮:凯氏蒸馏法;土壤全磷:氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法;土壤全钾:碱熔-火焰光度计或原子吸收分光光度计法;土壤碱解氮:碱解扩散法;土壤有效磷:碳酸氢钠提取-钼锑抗比色;土壤速效钾:乙酸铵浸提-火焰光度计或原子吸收分光光度计法;土壤 pH 值:电位法(水土比 2.5:1)。

### 1.4 数据统计分析

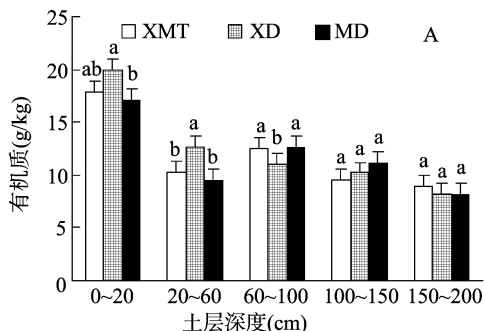
试验所得数据采用 SPSS 17.0 统计分析软件中的方差分析和显著性分析,结合 Excel 2013 进行分析处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 小麦/苜蓿间套种植对土壤有机质和 pH 值的影响

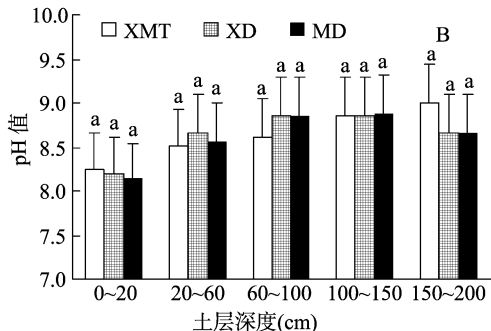
从不同深度土壤有机质测定结果(图 1-A)来看,无论是小麦、苜蓿单播还是间套作,都是表层(0~20 cm)土壤有机质含量最高,平均为 18.87 g/kg,根据全国第二次土壤普查分级标准<sup>[17]</sup>属于有机质四级,而深层土壤有机质含量最低(平均 8.07 g/kg)也达五级标准。60 cm 以上小麦单播处理(XD)土壤有机质含量显著高于苜蓿单播处理(MD),但随着深度增加这种趋势逆反,这与小麦和苜蓿的生物量分布密切相关。从根系分布特点来看,小麦根系 85% 分布在 100 cm 土体深度内,50 cm 以上占 60%<sup>[18]</sup>,而苜蓿属深根作物,种植第二年根系下扎深度可达 2 m,50 cm 以上根系只占一半,150 cm 深度根系量高达 15%<sup>[19]</sup>。地上生物量的分配是影响表层有机质含量的主要因素。由于试验执行小麦秸秆还田,而苜蓿则是适时收割,因此小麦间套苜蓿以后,地上小麦秸秆生产和还田数量减少,而苜蓿又增加了深层地下生物量的比例,从而导致 0~60 cm 土壤有机质含量  $XD > XMT > MD$ ,而深层 XMT 有机质含量却超过了 XD(60~100 cm)和 MD(150~200 cm)。

土壤 pH 值随深度变化趋势与有机质相反(图 1-B),随深度而增加,通体呈碱性;表层平均 8.2,比试验初期略微下降;深层平均 8.7~8.8,3 个处理间没有显著差异。



同一土层深度处理间不同小写字母代表在 0.05 水平上差异显著。XMT—小麦/苜蓿间套种; XD—小麦单播; MD—苜蓿单播。下同。

图1 各处理不同深度层次土壤有机质(A)和 pH 值(B)



### 2.2 小麦/苜蓿间套种植对土壤速效养分含量的影响

土壤碱解氮也叫有效氮,包括无机态氮(铵态氮、硝态氮)及易水解的有机态氮(氨基酸、酰胺和易水解蛋白质),与作物生长关系密切,能反映土壤近期内氮素供应情况。从不同深度土壤速效养分测定结果(图 2)来看,表层(0~20 cm)

XD 和 MD 处理碱解氮含量均处于中下水平,但与小麦播种前测定值相比不但没有减少,反而分别增加了 18% 和 38%;而 XMT 处理碱解氮含量(25 mg/kg)却降低了 53%。XD、MD 表层速效氮增加一方面与春季追肥有关,也与苜蓿固氮有关,而 XMD 速效氮含量减少则可能表明小麦和苜蓿间套种植后加

强了表层根系对氮素的吸收利用能力。向下 20 ~ 100 cm 深度情况相反,小麦/苜蓿间套处理的碱解氮含量达到五级水平(50 mg/kg 左右),小麦和苜蓿单播处理的却降为六级。深层 100 ~ 150 cm 的 3 个处理均达到五级水平,排序为 MD > XMT > XD;150 ~ 200 cm 深度排序为 XD > MD > XMT,小麦/苜蓿间套处理的碱解氮含量又降到最低水平。

经过 1 个麦季的消耗,XMT 和 XD 处理表层土壤速效磷含量接近(10 mg/kg),无论是对小麦来说还是对苜蓿来说都表现为缺磷状态<sup>[20-21]</sup>,而且在各处理深层土壤中速效磷含量基本处在 6 ~ 8 mg/kg 之间,MD 更是通体低于 7 mg/kg。60 ~ 100 cm 和 150 ~ 200 cm 2 个深度层次上 XMT 处理土壤速效磷含量显著低于 XD,但与 MD 处理相比,只在前一个深

度层次上差异显著,后一个层次上差异并不显著(图 2)。结果说明在这 3 种处理模式生产实践中磷肥的使用都具有必要性和增产的巨大可能性。

XD 表层 0 ~ 20 cm 速效钾含量(104 mg/kg)显著低于 MD 和 XMT,但后两者间几乎相等(136 mg/kg),虽然 3 个处理都比麦季开始前的基本土样速效钾含量大幅(40% ~ 50%)降低,但对小麦和苜蓿生长需求来说都属中上水平。向下 20 ~ 150 cm 土层深度内 3 个处理速效钾含量间差异不大,大致在 120 ~ 150 mg/kg,均处于钾素富余状态,底层 150 ~ 200 cm XMT 和 XD 处理更是达到了极高水平(191 mg/kg 和 153 mg/kg),即使是含量相对较低的 MD 也高达 111 mg/kg(图 2)。

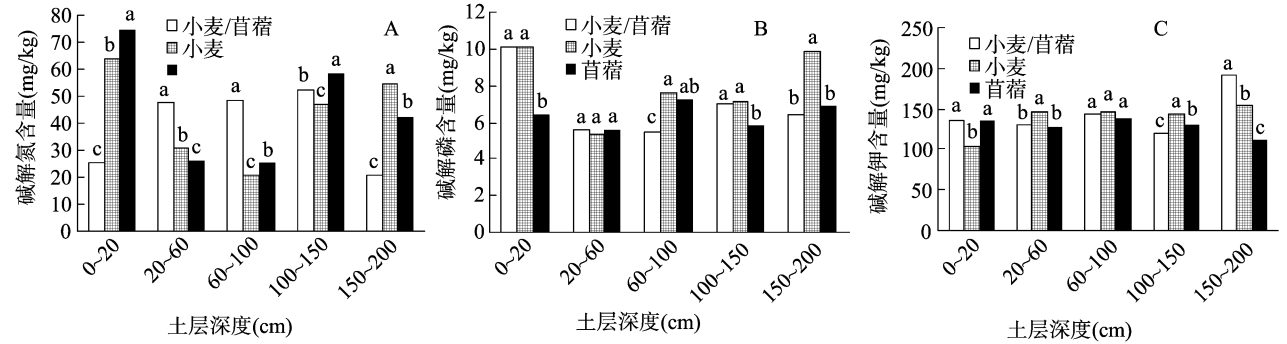


图2 各处理不同深度层次土壤有效养分含量

2.3 小麦/苜蓿间套种植对土壤全量养分含量的影响

3 个处理不同深度土壤全量养分测定结果如表 2 所示。表层 0 ~ 20 cm 各处理全氮含量间没有显著差异;全磷含量差异显著,排序为 XMT > XD > MD;全钾含量 MD > XMT > XD,但后两者间差异并不显著。20 ~ 60 cm 土层深度内 MD 和 XMT 全氮含量极显著高于 XD,全磷含量却是 XD 和 XMT 极显著高于 MD,但全钾含量三者间无显著差异。在 60 ~ 100 cm 深度层次上,XMT 全氮含量显著高于 XD,极显著高于

MD;全磷含量 MD > XMT > XD,且差异极显著;MD 与 XMT 全钾含量无显著差异,但两者均极显著高于 XD。100 ~ 150 cm 深度内 3 个处理全量养分差异极显著,全氮含量排序为 XMT > XD > MD,全磷含量为 MD > XMT > XD,全钾含量为 MD > XD > XMT。底层各处理不同养分间差异也达到显著水平,部分达到极显著水平,全氮为 MD > XD > XM,全磷 MD > XMT > XD,全钾 MD > XMT > XD。

表 2 各处理不同深度层次土壤全量养分含量

项目	处理	不同土层深度养分含量(g/kg)				
		0 ~ 20 cm	20 ~ 60 cm	60 ~ 100 cm	100 ~ 150 cm	150 ~ 200 cm
全氮	XD	1.13 ± 0.55aA	0.48 ± 0.03bB	0.56 ± 0.03bAB	0.48 ± 0.03bB	0.36 ± 0.02bAB
	MD	1.11 ± 0.55aA	0.66 ± 0.04aA	0.52 ± 0.03bB	0.27 ± 0.01cC	0.41 ± 0.02aA
	XMT	1.11 ± 0.55aA	0.64 ± 0.04aA	0.62 ± 0.03aA	0.56 ± 0.03aA	0.31 ± 0.01cB
全磷	XD	0.63 ± 0.03bB	0.71 ± 0.04aA	0.54 ± 0.02cC	0.71 ± 0.04cC	0.73 ± 0.04cB
	MD	0.52 ± 0.02cC	0.67 ± 0.03aA	0.82 ± 0.04aA	1.09 ± 0.06aA	0.96 ± 0.05aA
	XMT	0.79 ± 0.04aA	0.47 ± 0.02bB	0.67 ± 0.03bB	0.85 ± 0.04bB	0.86 ± 0.04bA
全钾	XD	17.48 ± 0.88bB	20.38 ± 1.02aA	17.67 ± 0.89bB	20.32 ± 1.01bAB	23.05 ± 1.16bAB
	MD	24.68 ± 1.23aA	20.70 ± 1.03aA	23.08 ± 1.16aA	22.99 ± 1.15aA	27.37 ± 1.37aA
	XMT	18.56 ± 0.93bB	21.33 ± 1.07aA	21.89 ± 1.09aA	16.89 ± 0.85cB	21.30 ± 1.07bB

注:各分析项目不同处理间数据后不同大写字母代表在 0.01 水平上差异显著,不同小写字母代表在 0.05 水平上差异显著。

2.4 小麦/苜蓿间套种植对土壤养分剖面分布的影响

为了更形象地表达不同处理间土壤养分的剖面分布特征差异,根据以上 3 个处理的速效和全量养分数据结果分别计算了各种养分形态在 5 个深度层次上的含量占 2 m 全剖面总量的百分比,以及各个层次上 3 种养分的活化比(速效养分与全量养分之比),结果如图 3 所示。

许多研究表明土壤有机质的剖面分布大致呈“S”形<sup>[22-23]</sup>,与秸秆还田、根系分布、自然气候水分条件以及化肥

施用等都着复杂而密切的联系。试验中 3 种耕作处理模式土壤有机质在 2 m 深土壤内的剖面分布基本也是呈“S”形,60 cm 深度是第一个拐点,向上越接近表层有机质含量占比越高,表层均在 30% 之上;向下 XD 是随深度增加有机质含量占比开始减小,到 150 cm 深度处减幅加大,但拐点不明显;MD 和 XMT 处理在 60 ~ 100 cm 深度有机质含量占比随深度增加,100 cm 成为第二拐点,向下改为随深度增加而减少。这种分布规律表明在 60 cm 之上,有机质平衡过程受地上枯

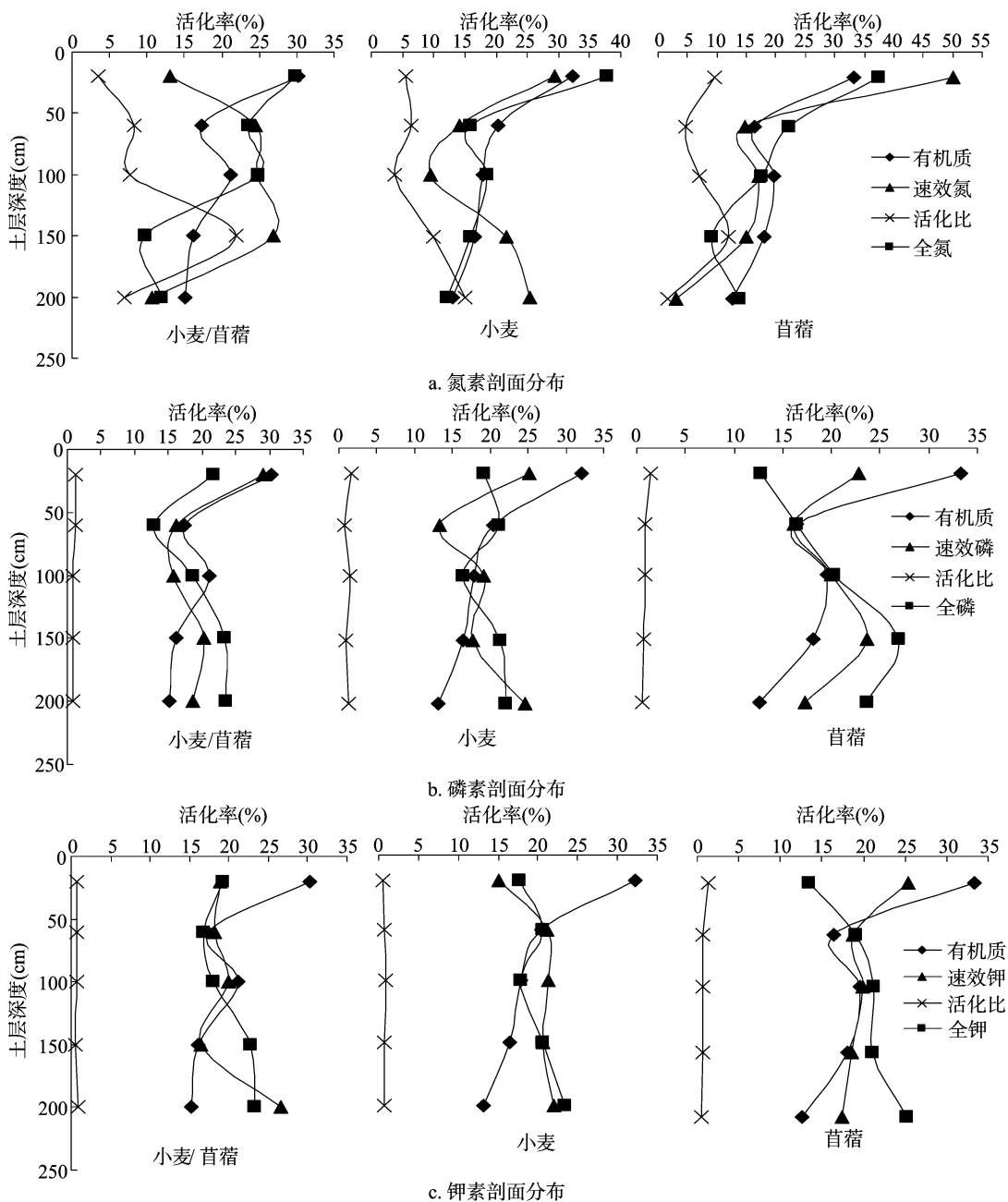


图3 2 m 深度范围内各处理土壤养分及其活化率的剖面分布

落物和还田秸秆输入影响较多,所以均表现为向上的净累积增加趋势。60 cm 之下的深层土壤有机质输入主要来自作物根系分布,MD 和 XMT 均在 60~100 cm 表现出有机质净累积的趋势,说明苜蓿相对于小麦来说除了有固氮功能之外还具有增加土壤有机质的优势。XMT 在 150~200 cm 的底层土壤有机质占比为 15.2%,显著高于 XD (13.1%) 和 MD (12.6%),则可能是小麦与苜蓿间套后进一步促进了深根作物苜蓿深层根系向下分布的有力说明。

全氮在不同层次含量占比与土壤有机质密切相关( $r=0.899^{**}$ ),速效氮也与有机质显著相关( $r=0.557^{*}$ ),尤其是 MD 处理速效氮含量占比剖面分布与有机质更是高度相关( $r=0.995^{**}$ ),速效氮与全氮之间当然极显著相关( $r=0.569^{**}$ )。不同处理间进行比较可以看出,表层 MD 速效氮

含量占比最大,高达全剖面的 50%,而 XMT 的只有 13%,XD 以近 30% 居中。MD 速效氮含量占比随土层深度增加而减少;XD 在 100 cm 深度处降到最低(9%),之后开始向下增加,底层速效氮含量占比达全剖面 1/4;XMT 在 60~150 cm 土体内速效氮含量占比处于 24%~27% 之间,到底层迅速开始降低。氮素活化比剖面分布与速效氮含量占比有正相关关系( $r=0.425, P<0.1$ ),表层 MD>XD>XMT,结合 XD 表层速效氮含量的低值占比,可能说明了与苜蓿间套后会促进小麦对氮素的吸收利用。在底层 XD 的速效氮含量占比和氮素活化比优势可能是麦田生产中速效氮流失的结果,而 MD 和 XMT 的相对低值却恰好说明深根作物苜蓿对常规麦田深层土壤氮素流失问题的解决前景。

3 个处理不同深度土壤全磷含量占比剖面分布与有机质

没有显著相关关系,但速效磷与有机质分布极显著相关( $r = 0.576^{**}$ ),磷素活化比与有机质极显著相关( $r = 0.663^{**}$ )。MD 表层全磷含量占比(12.7%)远低于 XD(19.1%)和 XMT(21.7%),速效磷也偏低,随深度增加其全磷和速效磷含量占比都呈增加趋势,到 150 cm 深度后开始减少。XMT 除表层外其他深度层次全磷和速效磷含量占比剖面分布与 MD 相似。XD 全磷含量占比全剖面分布相对比较均匀(20% ~ 22%),只在表层 0 ~ 20 cm 和 60 ~ 100 cm 2 个深度层次上相对较低(分别为 19.1% 和 16.3%);速效磷含量占比在 20 ~ 60 cm 深度上最低,比另外 2 个处理低了 3 个百分点。3 个处理全剖面磷素活化比都较低(0.8% ~ 1.6%),XD 磷素活化比除 20 ~ 60 cm 深度外都在 1% 以上,明显优于 MD 和 XMT。从 3 个处理磷素养分含量及其剖面分布的结果可以看出,苜蓿在生长过程中对磷素的消耗很大,尤其是表层土壤;而小麦在 20 ~ 60 cm 根系层内对速效磷消耗剧烈,导致磷素肥力降低。小麦和苜蓿间套作在提高根系层土壤磷活性(肥力)的同时也加剧了磷素的消耗,所以在生产实践中磷肥的施用对保障这一系统生产来说很关键。

土壤全钾含量占比剖面分布与有机质呈极显著负相关关系( $r = -0.582^{**}$ ),但速效钾与有机质分布相关性不显著;钾素活化比与有机质也极显著相关( $r = 0.567^{**}$ )。3 个处理钾素含量占比剖面分布差异在表层表现最为突出,MD 全钾含量占比(13.5%)明显低于 XD(17.7%)和 XMT(19.2%)处理,但速效钾含量占比却是 MD 最高(25.4%),XD 最低(15.1%),XMT 居中(18.9%)。20 ~ 100 cm 深度范围内 XD 和 XMT 处理全钾含量占比与 MD 相比偏低一些,速效钾 MD 和 XMT 比较一致,低于 XD。底层速效钾含量占比 MD < XD < XMT。

### 3 结论

3 种耕作处理模式土壤有机质在 2 m 深土壤内的剖面分布呈“S”形。苜蓿相对于小麦来说除了有固氮功能之外还具有增加土壤有机质的优势。小麦间套苜蓿以后,地表有机质含量因地上小麦秸秆还田数量减少而下降,但在深层小麦会促进苜蓿根系向下分布,显著增加深层有机质含量。

全氮和速效氮含量剖面分布与土壤有机质密切相关。小麦/苜蓿间套种植体系中,表层土壤中由于苜蓿的存在促进了小麦对氮素的吸收利用,经过 1 个麦季的消耗后显著降低了速效氮水平,虽对后期苜蓿生长来说基本足够,但对夏玉米生产来说却处于缺氮的极低水平状态,因此如果接下来要种植夏玉米还是需要补充氮肥。但小麦套种苜蓿有利于提高 20 ~ 150 cm 深度土壤氮素肥力,同时还可在底层使常规麦田深层土壤氮素流失问题得以避免。

苜蓿在生长过程中对磷素的消耗很大,尤其是表层土壤;小麦和苜蓿间套作在提高根系层土壤磷活性(肥力)的同时也加剧了磷素的消耗,所以在生产实践中磷肥的施用对保障这一系统生产来说很关键。虽然苜蓿对表层土壤钾素消耗也很大,但在小麦/苜蓿间套体系中会使全剖面土壤钾素的消耗比例得以优化,故可以少施甚至不施钾肥。

致谢:试验过程中得到刘飞、赵圆峰等人的帮助,山西省临汾气象局提供气象资料,在此表示诚挚的感谢。

### 参考文献:

- [1] 任继周,林慧龙. 农区种草是改进农业系统、保证粮食安全的大步骤[J]. 草业学报,2009,18(5):1-9.
- [2] 雍太文,陈小容,杨文钰,等. 小麦/玉米/大豆三熟套作体系中小麦根系分泌特性及氮素吸收研究[J]. 作物学报,2010,36(3):477-485.
- [3] 张桂国,杨在宾,董树亭,等. 苜蓿+玉米间作系统饲料生产潜力的评定[J]. 草业学报,2011,20(2):117-126.
- [4] Bedoussac L, Justes E. The efficiency of a durum wheat-winter pea intercrop to improve yield and wheat grain protein concentration depends on N availability during early growth[J]. Plant and soil, 2003,330(1/2):19-35.
- [5] Blaser B C, Singer J W, Gibson L R. Winter cereal canopy effect on cereal and interseeded legume productivity[J]. Agronomy Journal, 2011,103(4):1180-1185.
- [6] 周道玮,孙海霞,刘春龙,等. 中国北方草地畜牧业的理论基础问题[J]. 草业科学,2009,26(11):1-11.
- [7] Marianne Sarrantonio, Eric R. Galland. The role of cover crops in North American cropping systems[J]. Crop Prod, 2003(8):53-73.
- [8] Zhang X H, Wang H L. Discussion on the perspective of wheat/alfalfa inter cropping in the wheat conservation tillage[J]. Scholars Journal of Agriculture and Veterinary Sciences, 2014,1(4B):265-268.
- [9] 潘幸来. 试论苜蓿-小麦生态系统[J]. 山西农业科学, 1983(8):18-19.
- [10] 周叔华. 老苜蓿地间播小麦试验介绍[J]. 农业科学通讯, 1955(9):546.
- [11] 马克争. 小麦-苜蓿间作对麦长管蚜及其主要天敌的种群动态的影响[D]. 杨陵:西北农林科技大学, 2004.
- [12] 张晓斌, 占新华, 周立祥, 等. 小麦/苜蓿套作条件下非污染土壤理化性质的动态变化[J]. 环境科学, 2011,32(5):1462-1470.
- [13] Wiersma J, Sheaffer C, Nelson G, et al. Intercropping legumes in hard red spring wheat under semi-arid conditions[J]. Crop Management, 2005,4(1):115-122.
- [14] Tomm G O, Foster R K. Effect of inter cropping wheat with forage legume on wheat production and ground cover[J]. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 2001,36(3):465-471.
- [15] Abdel Magid H M, Ghoneim M F, Rabie R K, et al. Productivity of wheat and alfalfa under intercropping[J]. Experimental Agriculture, 1991,27:391-395.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社, 2000:1-329.
- [17] 全国土壤普查办公室. 全国第二次土壤普查暂行技术规程[S]. 北京:农业出版社, 1979.
- [18] 刘荣花, 朱自玺. 冬小麦根系分布规律[J]. 生态学杂志, 2008,27(11):2024-2027.
- [19] 张晓红, 徐炳成, 李凤民, 等. 黄土塬区 3 种豆科牧草的竞争生长[J]. 中国生态农业学报, 2008,16(3):686-692.
- [20] 李明贵, 刘继华, 庞海海, 等. 苜蓿生产指标测定与土壤养分丰缺分析[J]. 山东畜牧兽医, 2014,35(2):66-68.
- [21] 陈子学, 侯正仿, 肖波, 等. 冬小麦土壤养分丰缺指标研究及推荐施肥建议[J]. 天津农林科技, 2012(5):1-3.
- [22] 张晓红, 徐炳成, 李凤民, 等. 黄土塬区 3 种豆科牧草的土壤养分剖面分别特征与平衡[J]. 中国生态农业学报, 2008,16(4):6-13.
- [23] 彭玲发, 郝明德, 来璐, 等. 黄土塬区长期施氮对土壤剖面养分分布的影响[J]. 西北植物学报, 2003,23(8):1475-1478.