

渭北旱地夏闲期秸秆还田和种植绿肥对土壤水分、养分和冬小麦产量的影响

李富翠, 赵护兵, 王朝辉*, 薛澄, 戴健, 孟晓瑜, 高亚军

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:研究渭北旱地秸秆和绿肥还田土壤水分、养分的变化,对黄土高原旱区作物高产稳产有重要意义。以夏季裸地休闲为对照,研究免耕小麦秸秆还田和种植豆科绿肥及二者混合对渭北旱地冬小麦产量,播前、开花期和收获后土壤水分、硝态氮、铵态氮、有效磷和速效钾数量的影响。试验结果表明,秸秆还田和种植绿肥对冬小麦籽粒产量和生物量无影响;夏闲期种植绿肥和秸秆+绿肥处理使播前和开花期 60~160 cm 土壤贮水减少;种植绿肥处理表层 0~20 cm 土壤硝态氮在播前显著增加 $10.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 收获期增加 $18.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;开花期种植绿肥土壤有效磷提高 $43.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 收获期有效磷数量仍较对照高 $24.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;秸秆还田和种植绿肥对土壤铵态氮和速效钾没有显著影响。可见,一年秸秆还田和种植绿肥对冬小麦产量没有产生显著影响,种植绿肥降低了土壤贮水,但提高了表层土壤硝态氮和有效磷数量,不同栽培方式对土壤铵态氮和速效钾含量没有影响。

关键词:夏闲期;秸秆还田;绿肥;速效养分;小麦产量

中图分类号:S181 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2011)09-1861-11

Effects of Straw Mulching and Planting Green Manure on Soil Water, Nutrient and Winter Wheat Yield on Weibei Plateau, China

LI Fu-cui, ZHAO Hu-bing, WANG Zhao-hui*, XUE Cheng, DAI Jian, MENG Xiao-yu, GAO Ya-jun

(College of Resources and Environmental Science, Northwest Agricultural and Forestry University, Yangling 712100, China)

Abstract: Effects of straw mulching and planting leguminous green manure on soil water and nutrient on Weibei Plateau is recognized to be of great significance for the high crop yield in dryland area. With bare fallow in summer as control, field experiments were carried out to study influences of wheat straw mulching, green manure planting and their mixture under no-tillage on the winter wheat yield, and the contents of soil water, nitrate-N, ammonium-N, available phosphorus(P) and potassium(K) at pre-seeding, flowering and post-harvest on dryland of Weibei Plateau. Obtained Results showed that straw mulching and green manure planting had no effect on the winter wheat yield and biomass. Planting green manure and straw+green manure in summer fallow period decreased water storage in 60~160 cm soil layers in stages of pre-seeding and flowering. Compared with the control, planting green manure significantly increased soil nitrate-N in 0~20 cm soil layer by $10.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ at pre-seeding and $18.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ at harvest. At flowering stage, planting green manure enhanced the amount of available P in surface soil by $43.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $24.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ at harvest. However, straw mulching and planting green manure had no significant effect on soil ammonium-N and available K. Consequently, one-year straw mulching and green manure planting had no obvious effect on the winter wheat yield, planting green manure decreased the soil water storage but increased amounts of soil nitrate-N and available P in the 0~20 cm soil layers, and different cultivation methods had no effect on soil ammonium-N and available K contents.

Keywords: summer fallow period; straw mulching; green manure; available nutrient; wheat yield

收稿日期:2011-02-27

基金项目:农业公益性行业科研专项(201103005,201103003);国家自然科学基金(30871596,30971866);现代农业产业技术体系建设专项

作者简介:李富翠(1984—),女,河北唐山人,在读硕士研究生,主要从事土壤植物营养方面的研究,E-mail:li_fucui043@126.com

* 通讯作者:王朝辉 E-mail:w-zhaohui@263.net

黄土高原旱区,水分匮乏且降雨年内分布不均,年降水 550 mm 的 60%以上集中在 7—9 月^[1];同时土壤贫瘠,有机质含量低。2009 年调查表明,全国农田土壤有机质平均为 22.97 g·kg⁻¹^[2],而黄土高原中南部的渭北旱塬仅为 11.4 g·kg⁻¹^[3],远远低于全国平均水平。土壤肥力水平低,供肥能力差成了制约该地区小麦高产与稳产的关键因素^[4-5]。为了提高作物产量,过量施肥,特别是施氮肥的现象普遍存在,也导致土壤中硝态氮大量残留,并在夏季降雨季节向土壤深层淋失。在渭河三级阶地的调查发现^[6],0~400 cm 的农田土壤剖面 NO₃-N 残留量达 1 000 kg·hm⁻² 以上,50% 以上分布在 200~400 cm 的土层。因此,提高土壤供肥和保肥能力,增强土壤蓄水保水能力是实现黄土高原旱地作物高产与稳产的关键。秸秆还田具有培肥改土、协调养分供应^[7]、蓄水保墒^[8-9]、增加产量^[9-10]等作用;绿肥是养地作物,既能肥田,又能改土^[11]。因此,在黄土高原旱地有限的降水条件下,研究秸秆还田和种植绿肥对土壤水分和养分的影响,对充分利用有限的水分资源、培肥土壤,解决西北地区“旱”与“薄”的问题,提高和稳定作物产量有重要意义。

作物秸秆含有大量的有机质、氮、磷、钾和微量元素,是重要的有机肥源^[12]。每 100 kg 麦秸腐解后能为土壤提供氮(N)0.64 kg、磷(P₂O₅)0.20 kg、钾(K₂O)1.07 kg、有机质 81.2 kg 和丰富的微量元素^[13],每 100 kg 稻草还田所带入土壤的钾相当于 3.8 kg KCl 的肥效^[14]。秸秆还田提高土壤碳固定,进而增加氮固定,进而引起土壤碳氮循环的一系列变化^[15]。在湖北的试验发现^[16]秸秆还田土壤有机质含量比对照增加 1.79 g·kg⁻¹,增幅达到 8.3%。近来,在不同地区进行的 100 多个 5 a 以上的定位试验表明^[17],秸秆还田平均增产 12.8%,但汪丙国在河北的冬小麦试验中,覆盖还田 4 500 kg·hm⁻² 秸秆并未增产^[18],表明秸秆还田能否增产受土壤、气候和环境等因素的影响。豆科绿肥能吸收利用一般作物难于吸收的养分,如难溶性磷、钾及微量元素等,还可以通过生物固氮,固定大气氮素,除满足本身需要外还能大量存积于土壤^[11]。1 hm² 豆科

绿肥可以固定氮(N)75~150 kg,磷(P₂O₅)21 kg、钾(K₂O)90 kg 和有机质 2 400 kg^[19]。陕西渭北旱塬合阳县的试验发现,夏闲期种植豆科绿肥并翻压(鲜质量为 2 360 kg·hm⁻²)对下季土壤水分和小麦产量并没有产生影响^[20],但 2008 年在长武县的试验却表明,在降水量少、水资源有限的条件下,于 7—9 月的夏闲季节种植豆科绿肥,虽然增加了土壤有机质、全氮、速效钾等含量,但由于大量消耗了夏季降水,降低了小麦播前土壤贮水,结果使后季小麦产量明显降低。

鉴于西北黄土高原旱地的干旱少雨和特殊气候环境,夏闲种植绿肥大量消耗夏季降水从而影响后季小麦产量,而秸秆还田覆盖地表可以减少土壤水分蒸发损失,具有保水的作用。二者结合起来效果如何?在该地区还未见报道。因此,本研究以常规的夏季裸地休闲为对照,研究了夏闲免耕条件下覆盖小麦秸秆或种植豆科绿肥以及二者结合对黄土高原旱地土壤水分、养分及冬小麦产量的影响,以期为提高黄土高原旱地的土壤肥力和生产能力提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验地点位于黄土高原中部的陕西省长武县丁家镇十里铺村,无灌溉条件的塬面旱地海拔 1 200 m,年均气温 9.1 ℃,无霜期 171 d。年均降水 580 mm 左右,60%以上集中在 7—9 月,年均蒸发量 1 500 mm,长期种植冬小麦。土壤母质为中壤质马兰黄土。2008 年试验开始前土壤基本理化性状见表 1。从 2009 年 7 月到 2010 年 6 月,试验区降水量见图 1。

1.2 试验设计

2009 年 6 月 23 日小麦收获时,设 4 个处理:对照、秸秆还田、种植绿肥、秸秆还田+种植绿肥(表 2)。当年 9 月 23 日绿肥初夹期将绿肥和秸秆翻压入土壤,麦秸的养分含量为氮(N)0.62%、磷(P₂O₅)0.07%、钾(K₂O)2.13%,绿肥的养分含量为氮(N)2.89%、磷(P₂O₅)0.69%、钾(K₂O)1.59%。10 月 2 日播种小麦,品种为长武 521,播种密度为 150 kg·hm⁻²,沿小区长

表 1 供试土壤性质

Table 1 Basic nutrient status in the plough layer of the experiment field

土层 Soil layer/cm	容重 Bulk density/g·m ⁻³	有机 C Organic C/g·kg ⁻¹	全氮 Total N/g·kg ⁻¹	有效磷 Available P/mg·kg ⁻¹	速效钾 Available K/mg·kg ⁻¹	pH	矿质氮/Mineral N	
							NO ₃ -N/mg·kg ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/mg·kg ⁻¹
0~10	1.22	8.73	0.81	5.4	139.9	8.18	13.0	2.9
10~20	1.49	8.32	0.73	3.6	119.4	8.17	13.2	2.2
20~40	1.32	6.28	0.58	1.6	122.0	8.24	8.6	1.8

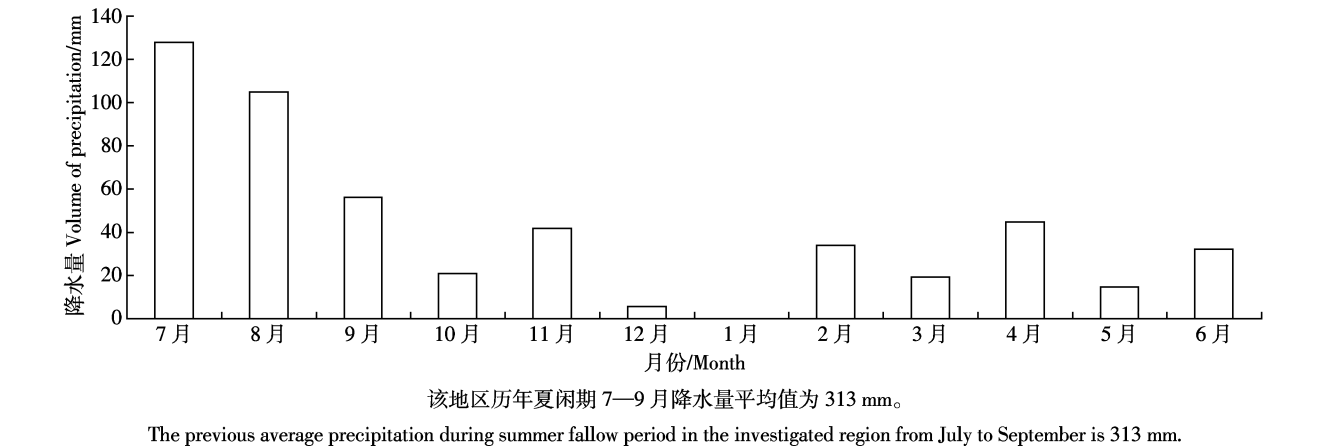


图 1 2009 年 7 月到 2010 年 6 月试验区降水量

Figure 1 The precipitation of the experiment area from July 2009 to June 2010

表 2 田间试验设计

Table 2 Field experimental design

处理 Treatments	基肥与追肥 Basal and topdressing fertilizer	栽培与管理 Cultivation and management
对照 Control	采用测土推荐施肥量,小麦播前基肥为 104 kg N·hm ⁻² 、105 kg P ₂ O ₅ ·hm ⁻² ;返青前 3 月 8 日追肥 34 kg N·hm ⁻² 。	小麦收获时秸秆全部收走,夏闲期免耕裸地休闲。下季小麦播前 9 d,深翻耕 1 次,耕深为 40 cm。
秸秆还田 Straw mulching	同上	小麦收后秸秆全部还田,均匀覆盖在地表,秸秆还田量为 3 714 kg·hm ⁻² (烘干重),下季小麦播前 9 d,深翻耕 1 次,耕深为 40 cm。
种植绿肥 Planting green manure	同上	小麦收后不施肥硬茬播种绿肥(大豆,地方品种),播种量 75 kg·hm ⁻² ,下季小麦播前 9 d,将绿肥打碎后翻压入土壤,耕深为 40 cm,绿肥翻压量为 5 881 kg·hm ⁻² (鲜重)。
秸秆还田+种植绿肥 Straw mulching+Planting green manure	同上	小麦收后秸秆全部还田的基础上硬茬种植绿肥。秸秆还田量为 3 714 kg·hm ⁻² (烘干重),绿肥翻压量为 5 881 kg·hm ⁻² (鲜重),下季小麦播前 9 d,将绿肥打碎后翻压入土壤,耕深为 40 cm。

边成行,行距为 20 cm。小区面积 6 m×22 m=132 m²。每处理重复 4 次,采用完全随机区组试验设计。氮肥采用尿素,含 N 为 46%;磷肥采用重过磷酸钙,含 P₂O₅ 为 46%。冬小麦整个生育期不灌水,2010 年 6 月 27 日收获。作物播种、管理、收获均与当地农户一致。

1.3 样品采集与收获

在 2009 年小麦收获后(6 月 23 日)、小麦播前(9 月 29 日)、2010 年抽穗开花期(5 月 19 日)、收获后(2009 年 6 月 29 日)用土钻(钻头直径为 4 cm)分别采集 0~300 cm 的土样,表层 0~40 cm 以每 10 cm 为 1 个层次采集;40~300 cm 以每 20 cm 为 1 个层次采集。每小区选择 2 个点,同层样品混合,剔除作物根系后混匀作为分析样品。

在小麦收获期采集植物地上部分,每小区随机选取 4 个 1 m 长的样段,每个样段的小麦植株连根拔起,于根茎结合处减掉根系后同 1 小区 4 个样段混合,作为 1 个分析样品。

小麦采用机械收获方式,全区收获。

1.4 测定项目及方法

1.4.1 土壤水分

称鲜土样 20 g 左右(精确至 0.01 g)放入称好重量的铝盒中,在 105 ℃条件下烘干 24 h,用土样鲜重和干重之差计算土壤水分,水分含量以水分占干土重的百分数表示。

1.4.2 土壤硝态氮和铵态氮

将新鲜土样中大的土块捏碎、过 3 mm 筛后,称取 5.00 g 新鲜土样,放入 200 mL 振荡瓶中,加入 50 mL 1 mol·L⁻¹ KCl 溶液(土液比 1:10)。在 200 r·min⁻¹ 下振荡 1 h,过滤后用连续流动分析仪测定滤液中硝态氮(NO₃-N)和铵态氮(NH₄⁺-N)。土壤硝、铵态氮以每千克土中硝、铵态氮的毫克数表示。

1.4.3 土壤有效磷

称取过 1 mm 筛的风干土样 2.50 g,加入 50 mL 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 溶液,放入 200 mL 振荡瓶中,加 1 g 无磷活性炭,200 r·min⁻¹ 下振荡 30 min,用无磷滤纸过滤后用连续流动分析仪测定滤液中的磷含量,土

壤有效磷以每千克土中有效磷的毫克数表示。

1.4.4 土壤速效钾

称取过 1 mm 筛的风干土样 5.00 g, 加入 50 mL 1 mol·L⁻¹ NH₄OAc 溶液, 在 200 r·min⁻¹ 下振荡 30 min, 过滤后用火焰光度计测定土壤滤液中速效钾的含量。土壤速效钾以每千克土中速效钾的毫克数表示。

1.4.5 作物产量、生物量

冬小麦产量采用机械, 全区收获计算籽粒产量, 生物量是根据 4 m 采样计算的收获指数结合产量进行估算。

1.5 统计方法

所有数据均采用 Excel 2003 和 DPS 7.05 软件进行处理。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田和种植绿肥对冬小麦产量及构成因素的影响

小麦收获期的测定(表 3)表明, 经过 1 a 田间试验, 不同栽培方式下冬小麦籽粒产量和生物量无显著差异。但秸秆还田有提高籽粒产量和生物量的趋势, 而种植绿肥使之降低。从产量构成因素来看, 秸秆还田使产量提高的主要原因在于提高了单位面积穗数和穗粒数, 种植绿肥产量有下降趋势原因在于单位面积穗数和千粒重的降低。

2.2 秸秆还田和种植绿肥对冬小麦各时期 0~300 cm 土层贮水量的影响

对不同时期土壤贮水量分析表明(图 2): 种植绿肥减少了播前和开花期 60~160 cm 土层贮水, 而对 0~60 cm 上层和 160~300 cm 下层土壤的贮水量没有显著影响。在 2009 年冬小麦收获时, 0~300 cm 土层土壤贮水量为 392.1 mm。经过 7—9 月的夏季休闲, 冬小麦播前 0~300 cm 土层土壤贮水量明显增加, 对照、秸秆还田、种植绿肥、秸秆还田+种植绿肥处理的

0~300 cm 土层土壤贮水量分别达到了 517.5、516.1、501.5 mm 和 500.3 mm, 且水分的增加主要表现在 0~160 cm 土层。但种植绿肥使 60~160 cm 土壤贮水增加幅度小, 贮水量比对照少 17.1 mm, 秸秆还田+种植绿肥比对照少 15.4 mm, 而仅秸秆还田覆盖与对照无显著差异。

从冬小麦播种到开花期, 土壤水分明显降低, 4 个处理 0~300 cm 土层的土壤水分分别为 487.9、484.3、481.5 mm 和 449.1 mm, 水分的降低主要表现在 0~160 cm 土层, 比播前降低 51.9、55.0、41.9 mm 和 49.7 mm。无论是 0~300 cm 土壤贮水总量, 还是 0~160 cm 土层水分下降, 不同处理间均无明显差异。到 2010 年小麦收获期, 土壤水分进一步降低, 4 个处理 0~300 cm 土层的土壤水分分别为 413.9、402.4、408.9 mm 和 406.2 mm, 水分的降低延深到了 0~160 cm 土层, 比播前降低 113.4、121.8、102.6 mm 和 106.1 mm, 比 2009 年收获期增加 11.8、5.5、5.6 mm 和 4.8 mm, 不同处理间仍无明显差异。

2.3 秸秆还田和种植绿肥对冬小麦各时期 0~300 cm 土层硝态氮的影响

对土壤硝态氮测定表明(图 3): 种植绿肥或秸秆还田对土壤硝态氮的影响主要发生在 200 cm 以上的土层。从 2009 年 6 月小麦收获到 9 月下季小麦播前的夏季休闲期间, 0~300 cm 土壤累积的硝态氮明显增加, 其中对照的累积量为 83.8 kg·hm⁻², 秸秆还田处理为 127.8 kg·hm⁻², 种植绿肥处理为 122.3 kg·hm⁻², 秸秆还田+种植绿肥处理为 79.9 kg·hm⁻², 分别较 2009 年小麦收获时高 24.4、68.4、62.9 kg·hm⁻² 和 20.5 kg·hm⁻²。秸秆还田和种植绿肥两个处理的硝态氮增加数量最多, 0~200 cm 土壤的硝态氮分别增加 65.9 kg·hm⁻² 和 60.5 kg·hm⁻²。表层 0~20 cm 秸秆还田、种植绿肥和秸秆还田+种植绿肥处理土壤硝态氮数量分别为 18.4、25.8 kg·hm⁻² 和 23.9 kg·hm⁻², 较对照高 3.3、10.7

表 3 秸秆还田和种植绿肥条件下冬小麦产量及构成因素

Table 3 Yield and components of winter wheat under straw mulching and planting green manure treatments

处理/Treatments	籽粒产量 Yield/ kg·hm ⁻²	生物量 Biomass/ kg·hm ⁻²	收获指数 Harvesting index/%	单位面积穗数 Spike numbers/×10 ⁴ ·hm ⁻²	穗粒数/ Kernels per spike	千粒重 1 000-kernel weight/g
对照 Control	3 055 a	6 763 a	45.1 a	233 a	33 a	39.6 a
秸秆还田 Straw mulching	3 145 a	6 879 a	45.7 a	235 a	34 a	39.7 a
种植绿肥 Planting green manure	2 973 a	6 678 a	44.5 a	231 a	33 a	39.2 a
秸秆还田+种植绿肥 Straw mulching+ Planting green manure	3 067 a	6 774 a	45.3 a	245 a	32 a	39.2 a

注: 同列数据后不同小写字母表示 LSD 检验在 0.05 水平上差异显著。

Note: Small letters following numbers show significant difference at 0.05 level (Duncan).

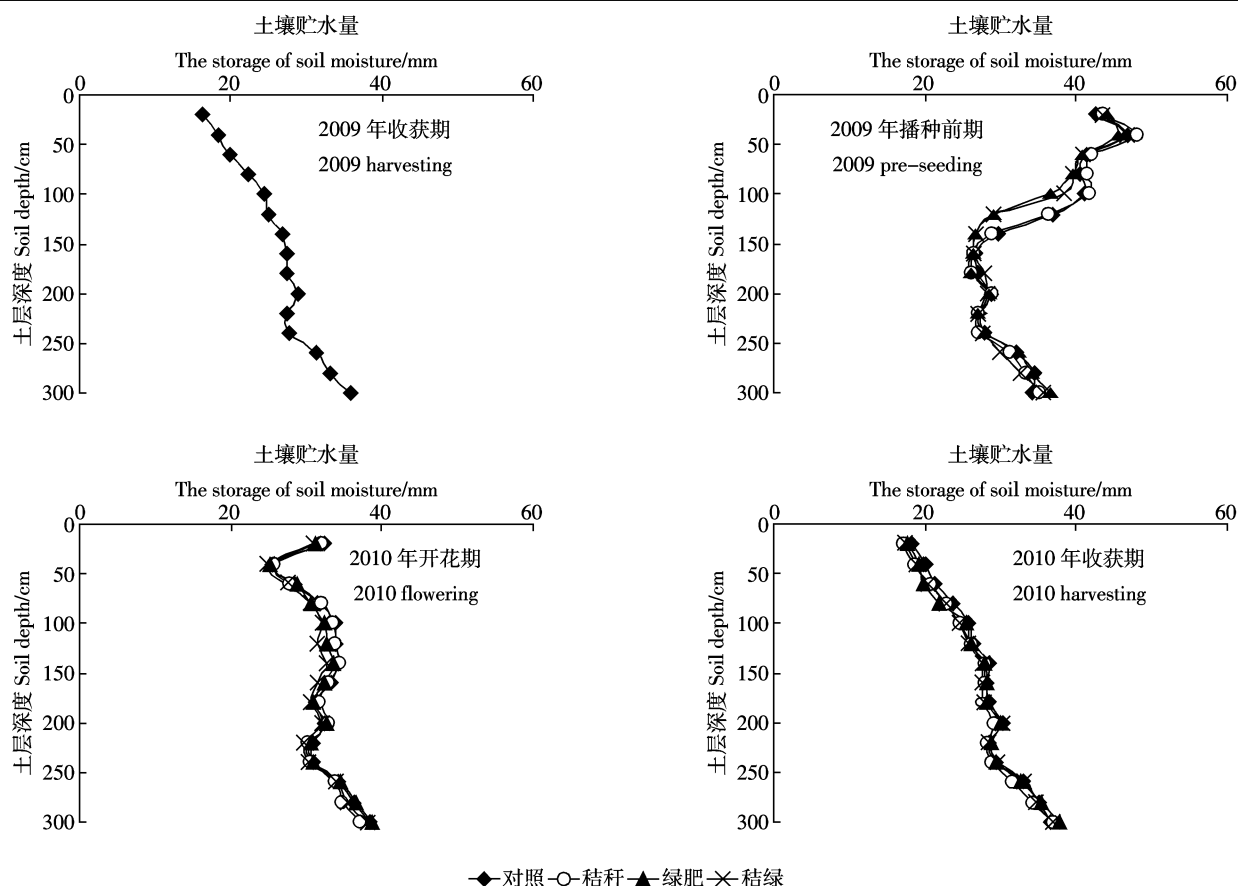


图2 秸秆还田和种植绿肥条件下土壤水分在0~300 cm土壤剖面上的分布

Figure 2 The distribution of moisture in 0~300 cm soil profiles under straw mulching and planting green manure treatments

$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $8.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中种植绿肥与对照处理差异显著。

由于小麦播种前氮素化肥施入和土壤有机氮矿化累积, 从2009年9月播种期到2010年小麦开花期, 土壤的硝态氮继续增加, 对照、秸秆还田、种植绿肥、秸秆还田+种植绿肥4个处理0~300 cm土层的硝态氮累积为 164.6 、 131.2 、 $99.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $101.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 较2009年小麦收获时分别高 105.2 、 71.8 、 $40.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $41.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 且硝态氮增加主要表现在0~60 cm土层, 增加值分别为 64.2 、 24.4 、 $33.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $18.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 开花期表层0~20 cm秸秆还田、种植绿肥和秸秆还田+种植绿肥处理土壤硝态氮数量分别为 52.4 、 $61.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $44.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 较对照低 36.7 、 $28.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $44.56 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 差异达到显著水平。从开花到收获土壤硝态氮又明显减少, 4个处理0~300 cm土层硝态氮累积分别为 120.0 、 125.4 、 $146.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $127.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 较2009年小麦收获时增加 60.6 、 66.0 、 $87.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $68.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 且增加也主要表现在0~60 cm土层, 增加值分别为 12.0 、 23.5 、

$39.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $13.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 收获期秸秆还田、种植绿肥和秸秆还田+种植绿肥处理0~20 cm表层土壤硝态氮数量分别为 34.3 、 $48.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $36.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 较对照高 4.7 、 $18.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $6.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 单独种植绿肥增加的最为明显, 但差异不显著。

2.4 秸秆还田和种植绿肥对冬小麦各时期0~300 cm土层铵态氮的影响

不同时期的测定(图4)表明, 与硝态氮相比, 土壤铵态氮数量很低, 各个时期0~300 cm剖面的累积量仅介于 14.6 ~ $48.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间, 随土层深度增加也无明显变化。夏闲期间秸秆还田或种植绿肥对土壤铵态氮数量无显著影响, 但随小麦生长期后延, 土壤铵态氮数量有明显变化。与2009年6月收获期相比, 经过夏季休闲0~300 cm土层的铵态氮有所增加, 对照、秸秆还田、种植绿肥和秸秆还田+种植绿肥处理的铵态氮分别为 40.9 、 46.1 、 $48.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $47.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 较6月份收获时增加了 15.6 、 20.8 、 $23.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $22.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。与对照相比, 秸秆还田+种植绿肥处理表层0~20 cm土壤铵态氮明显增加, 提高了 $2.7 \text{ kg} \cdot$

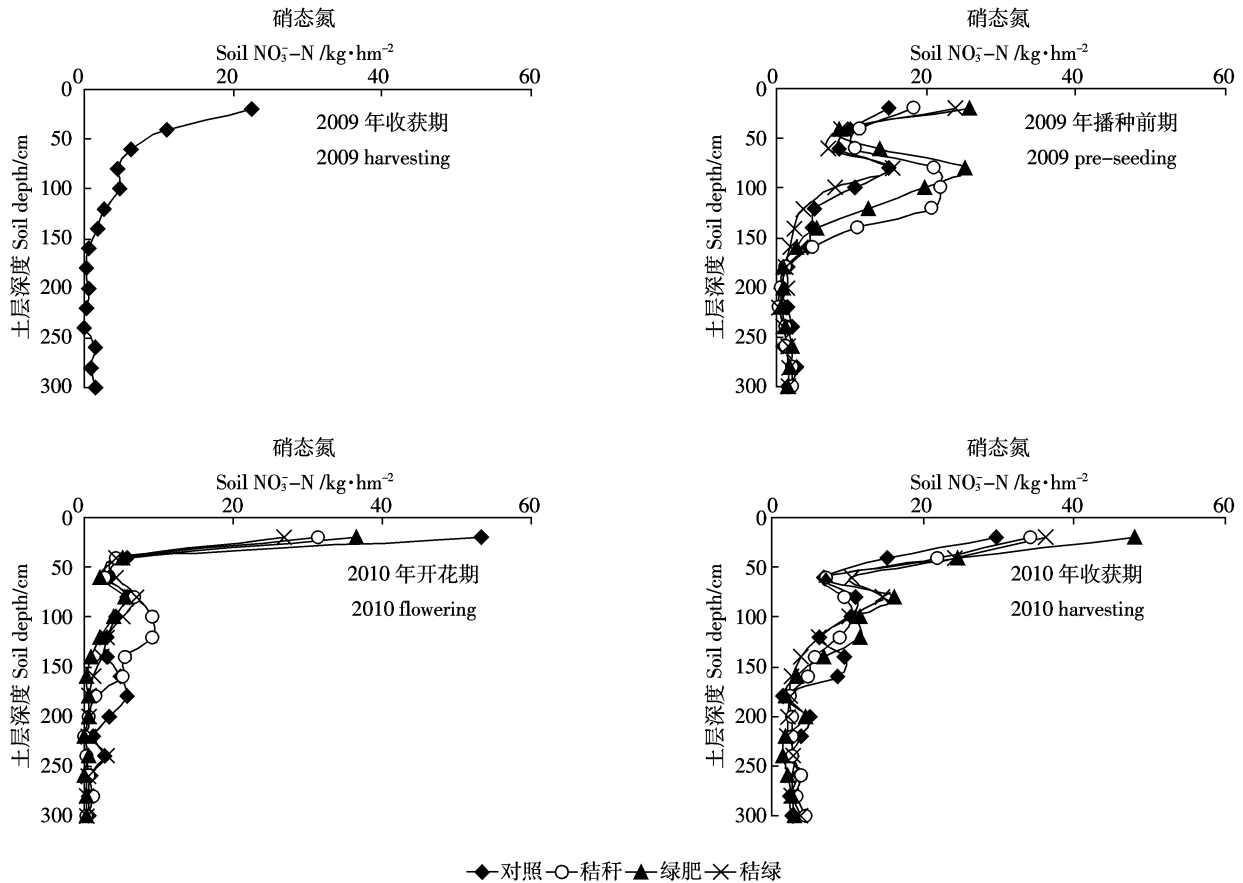


图 3 秸秆还田和种植绿肥条件下土壤硝态氮在 0~300 cm 土壤剖面上的分布

Figure 3 The distribution of nitrate N in 0~300 cm soil profile under straw mulching and planting green manure treatments

hm⁻²。到开花期,0~300 cm 土层铵态氮数量较播前降低,对照、秸秆还田、种植绿肥和秸秆还田+种植绿肥处理 0~300 cm 土层铵态氮数量分别为 21.7、29.4、15.5 kg·hm⁻² 和 37.8 kg·hm⁻²,与播前相比降低了 19.2、16.7、33.4 kg·hm⁻² 和 9.8 kg·hm⁻²。到冬小麦收获期,0~300 cm 土层铵态氮数量分别为 14.6、23.3、16.5 kg·hm⁻² 和 26.4 kg·hm⁻²,不同处理间没有显著差异,与播前相比降低了 26.3、22.8、32.4 kg·hm⁻² 和 21.2 kg·hm⁻²,与 2009 年小麦收获期相比对照、秸秆还田、种植绿肥降低了 10.7、2.0 kg·hm⁻² 和 8.8 kg·hm⁻²,而秸秆还田+种植绿肥增加了 1.1 kg·hm⁻²,各处理间差异不显著。

2.5 秸秆还田和种植绿肥对冬小麦各时期 0~300 cm 土层有效磷的影响

各个时期的测定表明,土壤有效磷主要累积在 0~60 cm 土层,随土层深度增加,有效磷数量逐渐减少,到 60 cm 达最低,60~300 cm 土层,有效磷数量略有增加,但变化不明显。秸秆还田或种植绿肥可以提高表层 0~20 cm 土壤有效磷数量,种植绿肥的效果更

为显著(图 5)。在冬小麦播种前,经过夏闲,土壤有效磷比 2009 年收获后明显增加,对照、秸秆还田、种植绿肥和秸秆还田+种植绿肥处理 0~300 cm 总量分别为 114.2、82.5、95.60 kg·hm⁻² 和 74.4 kg·hm⁻²,较 2009 年收获后分别增加了 62.7、14.9、28.0 kg·hm⁻² 和 6.8 kg·hm⁻²,对照处理增加最为明显。到开花期,对照、秸秆还田、种植绿肥和秸秆还田+种植绿肥处理 0~300 cm 总量分别为 85.1、86.5、143.5 kg·hm⁻² 和 77.7 kg·hm⁻²,与播前相比,对照处理降低了 29.1 kg·hm⁻²,其他 3 个处理分别增加了 4.0、47.9 kg·hm⁻² 和 3.3 kg·hm⁻²,有效磷的增加也主要表现在 0~20 cm 表层土壤,秸秆还田、种植绿肥和秸秆还田+种植绿肥处理 0~20 cm 有效磷数量分别为 22.3、61.4 kg·hm⁻² 和 19.6 kg·hm⁻²,与对照相比分别提高了 4.3、43.4 kg·hm⁻² 和 1.6 kg·hm⁻²,种植绿肥显著提高了表层土壤有效磷数量。到冬小麦收获期,对照、秸秆还田、种植绿肥和秸秆还田+种植绿肥处理 0~300 cm 总量分别为 77.3、113.5、122.7 kg·hm⁻² 和 91.7 kg·hm⁻²,与 2009 年小麦收获期相比,增加了 9.7、45.9、55.1 kg·hm⁻² 和

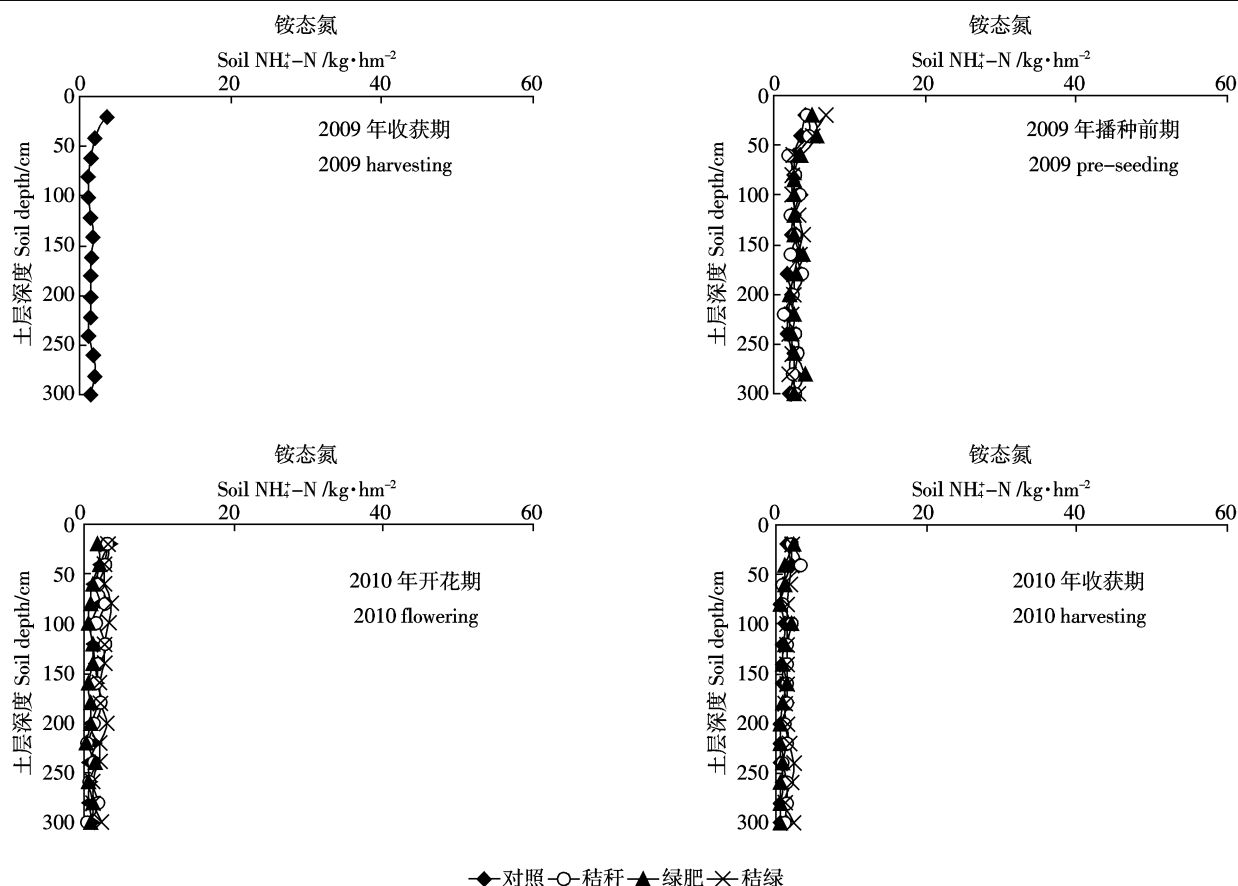


图4 秸秆还田和种植绿肥条件下土壤铵态氮在0~300 cm土壤剖面上的分布

Figure 4 The distribution of soil ammonium N in 0~300 cm soil profile under straw mulching and planting green manure

24.1 kg·hm⁻²。秸秆还田和种植绿肥处理0~20 cm土层有效磷数量分别为40.6 kg·hm⁻²和52.6 kg·hm⁻²,高出对照16.2 kg·hm⁻²和24.4 kg·hm⁻²;秸秆还田+种植绿肥处理0~20 cm有效磷数量为23.6 kg·hm⁻²,与对照相比无显著差异。

2.6 秸秆还田和种植绿肥对冬小麦各时期0~300 cm土层速效钾的影响

从各个时期的剖面分布看,在0~100 cm土层,随土层深度增加迅速下降,100~240 cm土层略有降低,240 cm以下土层又逐渐增加。秸秆还田和种植绿肥对土壤速效钾数量也无显著影响(图6),但随小麦生长期变化,土壤速效钾数量有明显变化。与2009年收获时相比,在7—9月的夏季休闲期0~300 cm土层速效钾数量明显增加,到播前对照、秸秆还田、种植绿肥和秸秆还田+种植绿肥处理分别为2 779、2 750、2 803 kg·hm⁻²和2 724 kg·hm⁻²,各处理较2009年收获分别增加273、244、297 kg·hm⁻²和218 kg·hm⁻²。从播种到冬小麦开花期,由于作物的吸收,0~300 cm土层速效钾数量较播前降低。开花期对照、秸秆还田、

种植绿肥和秸秆还田+种植绿肥处理0~300 cm土层速效钾数量分别为2 454、2 576、2 406 kg·hm⁻²和2 468 kg·hm⁻²,比播前分别降低325、174、397 kg·hm⁻²和256 kg·hm⁻²。到冬小麦收获期,对照、秸秆还田、种植绿肥和秸秆还田+种植绿肥处理速效钾数量分别为2 602、2 518、2 547 kg·hm⁻²和2 545 kg·hm⁻²,各处理比播前分别降低177、232、256 kg·hm⁻²和179 kg·hm⁻²,与2009年收获期相比增加了96、12、41 kg·hm⁻²和39 kg·hm⁻²。

3 讨论

3.1 秸秆还田与作物产量和土壤养分

已有的研究表明,秸秆还田能够改善土壤的理化性状^[7],提高土壤的蓄水保水能力,麦田夏闲期秸秆覆盖的土壤蓄水量比不覆盖的多45.3 mm^[21],同时能够培肥地力,在永寿夏闲地覆盖麦糠试验测定,0~30 cm耕层土壤有机质和碱解氮、速效磷、速效钾含量,麦糠覆盖3 a比不覆盖分别增加0.45%和8.8、0.6、10.5 mg·kg⁻¹^[22],因此能明显增加作物产量^[9-10],增产效

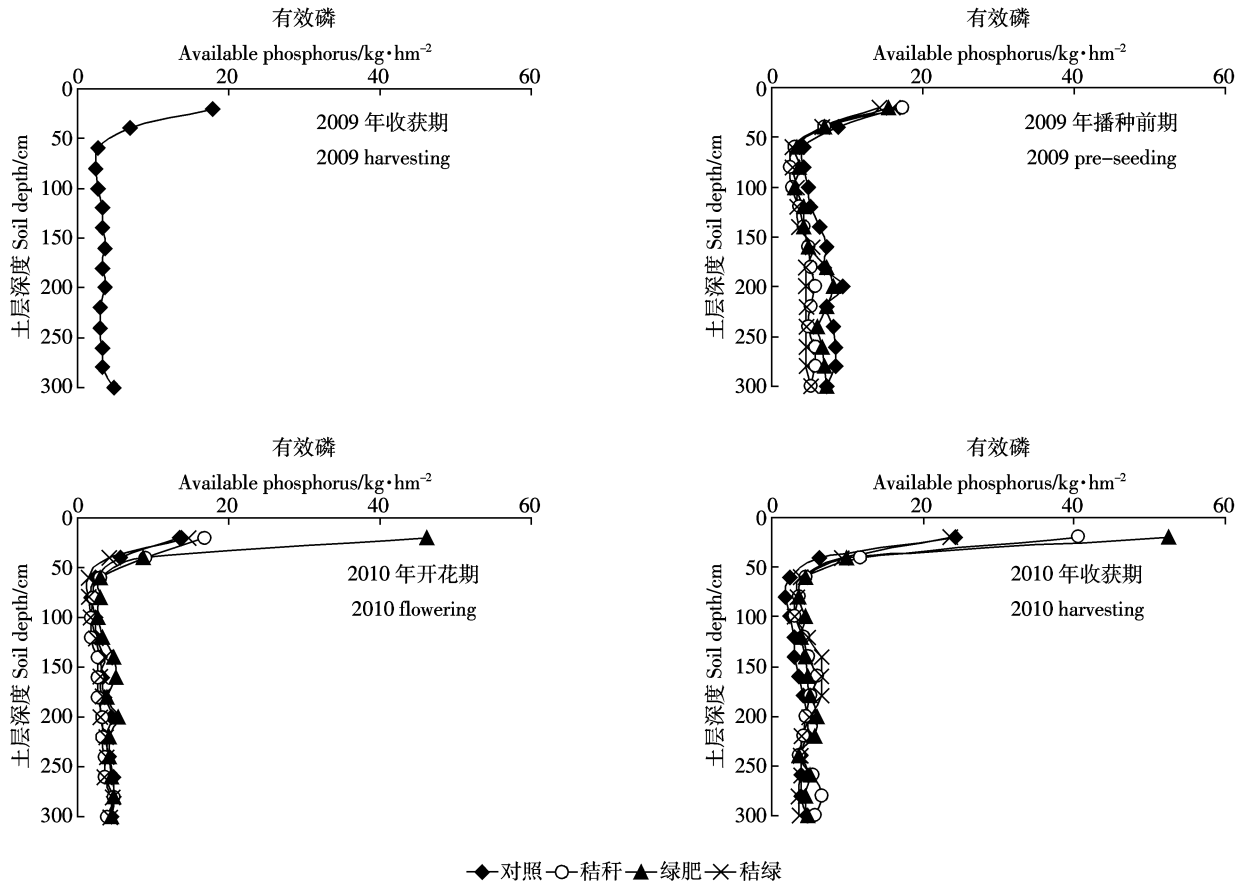


图 5 秸秆还田和种植绿肥条件下土壤有效磷在 0~300 cm 土壤剖面上的分布

Figure 5 The distribution of available phosphorus in 0~300 cm soil profiles under straw mulching and planting green manure treatments

果随着秸秆还田年数延续而增加^[23],是旱地农业增产的一项重要技术措施^[24]。但也有减产报道^[18]。

本试验结果表明,秸秆还田有提高籽粒产量和生物量的趋势,但差异不显著。秸秆还田能否使作物增产受很多因素的影响,有研究表明,秸秆覆盖增产幅度与降水有关^[25],干旱年份增产幅度较大,降水偏多有可能出现作物减产,同时还受秸秆还田量和秸秆还田年限的影响^[23]。2009 年夏闲期 7—9 月降水为 289.2 mm,较夏闲降雨平均值 313 mm 相比降雨少了 23.8 mm,与平均值差异不大,算不上干旱年份,因此夏闲秸秆覆盖地表对土壤水分的保蓄作用不明显,播前 0~300 cm 土壤贮水为 516.1 mm,较对照 517.5 mm 低 1.4 mm。此外,本试验是秸秆还田后的第一年,还田量也较低,因此没有表现出明显的增产效果。本研究还表明,秸秆还田当年就有增加表层土壤硝态氮和有效磷数量的趋势,对铵态氮和速效钾数量没有影响。在冬小麦开花期,由于对照处理干物质质量很低,为 4 994 kg·hm⁻²,而秸秆还田、种植绿肥和秸秆还田+种植绿肥处理分别为 6 263、5 779 kg·hm⁻² 和 5 840 kg·

hm⁻²,导致对照处理土壤中残留的硝态氮数量显著高于其他处理;收获期秸秆还田处理 0~20 cm 土层硝态氮较对照增加 4.7 kg·hm⁻²,差异都没达到显著水平。开花期和收获期秸秆还田处理 0~20 cm 土层有效磷数量分别提高 4.3 kg·hm⁻² 和 16.2 kg·hm⁻²,差异也没达到显著水平。国内外的大量研究证明^[26],免耕留茬覆盖对土壤养分的影响非常显著。但这往往是多年覆盖后出现的现象,短期(1、2 a 或 3、4 a)的免耕覆盖还田对土壤养分产生的效果也可能没有长期覆盖明显。

3.2 种植绿肥与作物产量和土壤养分

绿肥是一种优质的有机肥料,对改良和培肥土壤具有重要的作用。夏闲期种植绿肥,能很好的覆盖地面,缓和暴风雨对土壤的直接侵蚀,减少水土肥的流失,改善生态环境^[27],绿肥翻压、分解后,将自身的氮、磷、钾等元素归还土壤,同时,由于绿肥和微生物之间的相互作用,对土壤的各种营养元素也产生较大的影响^[28]。周开芳和何炎在遵义地区进行绿肥翻压试验结果表明^[29],绿肥翻压后能使土壤有机质和碱解氮、速效磷、速效钾分别提高 0.07% 和 1.9、4.7、3.1 mg·kg⁻¹。

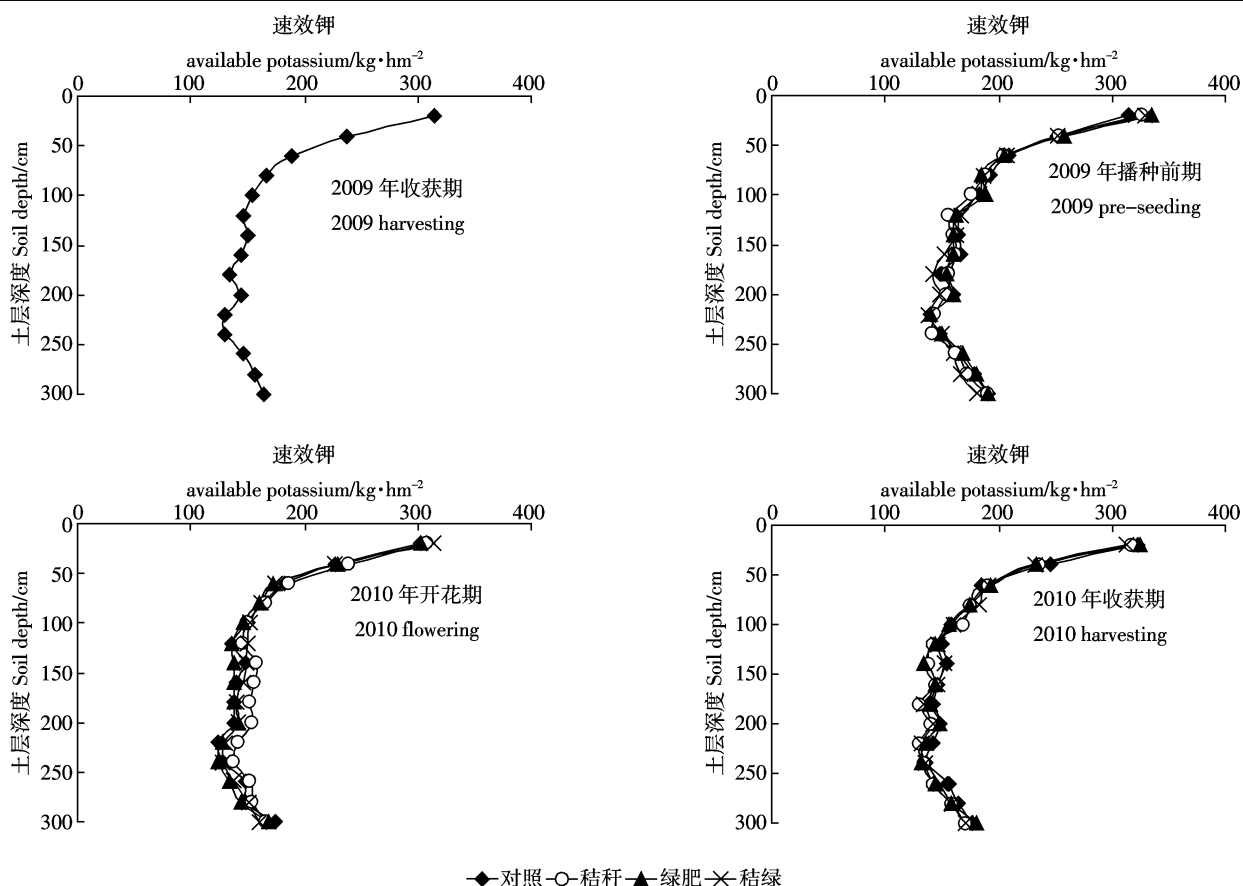


图6 秸秆还田和种植绿肥条件下土壤速效钾在0~300 cm土壤剖面上的分布

Figure 6 The distribution of available potassium in 0~300 cm soil profiles under straw mulching and planting green manure treatments

绿肥翻压玉米籽粒产量较对照增加 $1\,050\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 增产 12.5%。张树兰等^[20]在渭北旱塬的试验中发现, 夏闲种植豆科绿肥并翻压 (鲜质量为 $2\,360\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 对下季土壤水分和小麦产量并没有产生影响。

本研究结果表明: 在西北旱区降水量少、水资源有限的条件下, 于7—9月的夏闲季节种植豆科绿肥, 可以显著提高土壤硝态氮和有效磷含量, 提高土壤养分供应能力, 种植绿肥使收获期表层0~20 cm土壤硝态氮数量较对照显著增加 $18.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 种植绿肥处理0~20 cm土层有效磷数量较对照提高了 $24.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 差异显著。夏闲种植绿肥作物消耗了夏季降水, 降低了播前60~160 cm土层贮水, 但到冬小麦收获期, 各处理土壤水分一致、无明显差异。原因主要是对照和秸秆还田处理播前土壤水分含量较高, 促进了小麦生长, 尽管没有形成产量上的明显差异, 但仍消耗了较多的土壤水分, 致使不同处理间水分差异不再显著。然而, 播前0~60 cm土层贮水没有降低, 原因在于播前9 d将绿肥翻压入土时深犁地40 cm, 在此期间降雨入渗使上层土壤水分得到恢复。在等

养分条件下, 绿肥配施化肥农作物产量与单施化肥相当。但随着年限的延长, 其增长率优于单施化肥区^[30]。高菊生等^[31]在红壤17 a定位试验发现紫云英翻压还田 ($11\,250\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 鲜质量) 显著提高了水稻的产量。由此看来绿肥还田是一个累积效应, 因此需要长期定位进行试验, 才能显示出绿肥的增产效果。

3.3 秸秆还田+种植绿肥与作物产量和土壤养分

对于秸秆和绿肥混合还田的报道较少, 有研究表明就提高土壤养分而言, 施用绿肥+秸秆效果优于单施绿肥^[32]。孙锐峰等^[33]在贵州省黔西县进行的绿肥与秸秆混合还土的效果试验表明, 绿肥与秸秆混合施用玉米增产效果明显, 粗蛋白含量明显提高, 土壤有机质、全量氮、磷、钾比对照土壤略有增加, 土壤pH、有效磷略有增加, 初步认为绿肥与秸秆混合施用比单一秸秆还田更好。对于硝态氮而言, 秸秆和绿肥混合还田对播前表层0~20 cm增加量较单独种植绿肥低 $1.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 但比单独秸秆还田处理高 $5.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 原因可能是秸秆将一部分硝态氮吸附固定。冬

小麦收获期,表层硝态氮数量与单独秸秆还田相当,都高于对照而低于单独种植绿肥处理,可能是因为秸秆碳氮比较高,秸秆还田促使土壤微生物活性增强,导致部分矿质氮转化为生物固持态氮^[34]。对于土壤有效磷,单独种植绿肥和秸秆还田都增加了表层土壤有效磷数量,但将二者混合还田对土壤有效磷数量却没有影响,可见秸秆和绿肥混合还田是一个复杂的过程,还需要进一步的试验验证来解释其中的原因。

4 结论

在黄土高原旱区降水量少、水资源有限的条件下,于7—9月的夏闲季节进行免耕秸秆覆盖和种植绿肥并于播前9d翻压对下季冬小麦产量没有产生显著影响;秸秆还田和种植绿肥提高了表层土壤硝态氮和有效磷数量,单独种植绿肥的效果更为明显,对土壤铵态氮和速效钾数量没有显著影响;夏闲期种植绿肥作物消耗了夏季降水,土壤60~160cm层次的贮水降低。

参考文献:

- [1] 王西娜,王朝辉,李生秀. 种植玉米与休闲对土壤水分和矿质态氮的影响[J]. 中国农业科学, 2006, 39(6): 1179-1185.
WANG Xi-na, WANG Zhao-hui, LI Sheng-xiu. Influence of planting maize and fallowing on soil moisture and mineral nitrogen[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(6): 1179-1185.
- [2] 监测表明:甘肃土壤有机质低,有害重金属含量低[EB]. 兰州:甘肃日报, 2010-06-28.
<http://news.163.com/10/0628/03/6A83QA2900014AED.html>.
- [3] 陕西省耕地土壤有机质含量情况[EB]. 西安:黄文敏, 2010-03-11.
http://www.natesc.gov.cn/Html/2010_03_11/2_29240_2010_03_11_135537.html.
- [4] Li F M, Wang T C, Cao J. Effect of organic matter on total amount and availability of nitrogen and phosphorus in loess soil of Northwest China [J]. *Communication of Soil Science and Plant Analysis*, 1998, 29: 947-953.
- [5] Li S X, Wang Z H. Farming system for conservation of soil and water on the loess plateau in China[J]. *Soil and Environment*, 2002, 5(2): 83-104.
- [6] 袁新民, 同延安, 杨学云, 等. 施用磷肥对土壤 NO_3^- -N 累积的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(4): 397-403.
YUAN Xin-min, TONG Yan-an, YANG Xue-yun, et al. Effect of phosphate application on soil nitrate nitrogen accumulation[J]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 2000, 6(4): 397-403.
- [7] 劳秀荣, 吴子一, 高燕春. 长期秸秆还田改土培肥效应的研究 [J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 49-52.
LAO Xiu-rong, WU Zi-yi, GAO Yan-chun. Effect of long-term return-
- ing straw to soil on soil fertility [J]. *Transactions of the CSAE*, 2002, 18(2): 49-52.
- [8] 赵聚宝, 梅旭荣, 薛军红, 等. 秸秆覆盖对旱地作物水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 1996, 29(2): 59-66.
ZHAO Ju-bao, MEI Xu-rong, XUE Jun-hong, et al. Effect of straw mulching on crop water utilization efficiency in dryland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1996, 29(2): 59-66.
- [9] 路文涛, 贾志宽, 高飞, 等. 秸秆还田对宁南旱作农田土壤水分及作物生产力的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(1): 93-99.
LU Wen-tao, JIA Zhi-kuan, GAO Fei, et al. Effects of straw returning on soil water and crop productivity in the rainfed area of southern ningxia, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(1): 93-99.
- [10] 赵鹏, 陈阜. 秸秆还田配施化学氮肥对冬小麦氮效率和产量的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(6): 1014-1018.
ZHAO Peng, CHEN Fu. Effects of straw mulching plus nitrogen fertilizer on nitrogen efficiency and grain yield in winter wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(6): 1014-1018.
- [11] 别家新. 以土为本, 培肥地力[J]. 农家顾问, 1997, 11: 18-19.
- [12] 陆欣. 土壤肥科学 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2002: 292-294.
LU Xin. Soil Fertility Science[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2002: 292-294.
- [13] 赵凤霞, 温晓霞, 杜世平, 等. 渭北地区残茬秸秆覆盖农田生态效应及应用技术实例[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(3): 90-95.
ZHAO Feng-xia, WEN Xiao-xia, DU Shi-ping, et al. Ecological effects and applied techniques of stubble mulching in the Weibei area[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(3): 90-95.
- [14] 陈兰详, 夏淑芬, 许松林. 小麦-玉米轮作覆盖稻草对土壤肥力及产量的影响[J]. 土壤, 1996, 28(3): 156-159.
CHEN Lan-xiang, XIA Shu-fen, XU Song-lin. Effects of straw mulching on soil fertility and crop yield in wheat-maize rotation system[J]. *Soil*, 1996, 28(3): 156-159.
- [15] Watkins N, Wessel WW. Gross nitrogen transformation associated with the decomposition of plant residues[J]. *Soil Biol Biochem*, 1996, 28: 169-175.
- [16] 余延丰, 熊桂云, 张继铭, 等. 秸秆还田对作物产量和土壤肥力的影响[J]. 湖北农业科学, 2008, 47(2): 169-171.
YU Yan-feng, XIONG Gui-yun, ZHANG Ji-ming, et al. The effect of straw reapplication on yields of grain crops and soil fertility in Jiangnan Plain[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2008, 47(2): 169-171.
- [17] 江永红, 宇振荣, 马永良. 秸秆还田对农业生态系统及作物生长的影响[J]. 土壤通报, 2001, 32(5): 209-213.
JIANG Yong-hong, YU Zhen-rong, MA Yong-liang. The effect of stubble return on agro-ecological system and crop growth[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2001, 32(5): 209-213.
- [18] 汪丙国, 勒孟贵, 方连玉, 等. 衡水试验场冬小麦田土壤水流动系统分析[J]. 水土保持研究, 2001, 8(1): 89-93.
WANG Bing-guo, LE Meng-gui, FANG Lian-yu, et al. Analysis of soil water flow system of the winter wheat cropland in Hengshui experimental area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2001, 8(1): 89-

- 93.
- [19] 沈洁, 陆炳章, 陈正斌, 等. 绿肥对土壤质量的影响[J]. 土壤, 1989, 2(1):32-34.
- SHEN Jie, LU Bing-zhang, CHEN Zheng-bin, et al. Effects of green manure on soil quality[J]. *Soil*, 1989, 2(1):32-34.
- [20] 张树兰, Lars Lovdahl, 同延安. 渭北旱塬不同田间管理措施下冬小麦产量及水分利用效率[J]. 农业工程学报, 2005, 21(4):20-24.
- ZHANG Shu-lan, Lars Lovdahl, TONG Yan-an. Effects of different field management practices on winter wheat yield and water utilization efficiency in Weibei loess plateau[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(4):20-24.
- [21] 毛瑞洪. 夏闲地麦糠覆盖增产效果分析[J]. 中国农业气象, 1993, 14(4):36-38.
- MAO Rui-hong. Effects of wheat bran covered on summer fallow field on yield[J]. *China Agricultural Meteorology*, 1993, 14(4):36-38.
- [22] 刘巽浩, 王爱玲, 高旺盛. 实行作物秸秆还田促进农业可持续发展[J]. 作物杂志, 1998(5):1-5.
- LIU Xun-hao, WANG Ai-ling, GAO Wang-sheng. Implementing straw mulching to promote agricultural sustainable development[J]. *Crops Magazine*, 1998(5):1-5.
- [23] 马晓丽, 贾志宽, 肖恩时, 等. 渭北旱塬秸秆还田对土壤水分及作物水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(5):59-64.
- MA Xiao-li, JIA Zhi-kuan, XIAO En-shi, et al. Effects of wheat-residue application on soil water and water use efficiency in the Weibei loess plateau[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(5):59-64.
- [24] 李生秀, 等. 中国旱地农业[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004:764-800.
- LI Sheng-xiu, et al. Dryland agriculture in China[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2004:764-800.
- [25] 冷石林, 韩仕峰. 中国北方旱地作物节水增产理论与技术[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1996:143-150.
- LENG Shi-lin, HAN Shi-feng. Theory and technology of conservation of water resources to increase production on dryland crops in Northern China [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1996:143-150.
- [26] 高亚军, 黄东迈, 朱培立, 等. 免、少耕对土壤肥力的影响[C]//李生秀. 土壤-植物营养研究文集, 西安: 陕西科学技术出版社, 1999: 118-127.
- GAO Ya-jun. HUANG Dong-mai, ZHU Pei-li, et al. Effects of free and reduced tillage on soil fertility[C]//LI Sheng-xiu. Soil - plant nutrition papers, Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1999: 118-127.
- [27] 方珊清, 孙时银, 汪雪薇. 发展绿肥生产是生态农业建设的有效措施[J]. 安徽农学通报, 2004, 10(2):68.
- FANG Shan-qing, SUN Shi-yin, WANG Xue-wei. The development of green manure production is an effective measure of ecological agriculture[J]. *Anhui Agri Sci Bull*, 2004, 10(2):68.
- [28] 高玲, 刘国道. 绿肥对土壤的改良作用研究进展[J]. 北京农业, 2007, 12(2):29-33.
- GAO Ling, LIU Guo-dao. Progress of green manure in soil improvement[J]. *Beijing Agricultural*, 2007, 12(2):29-33.
- [29] 周开芳, 何炎. 豆科冬绿肥翻压对土壤肥力和杂交玉米产量及品质的影响[J]. 贵州农业科学, 2003, 31(增刊):42-44.
- ZHOU Kai-fang, HE Yan. Effects of the winter legumes green manure on soil fertility and hybrid maize production and quality[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2003, 31(Suppl):42-44.
- [30] 包兴国, 邱进怀, 刘生战, 等. 绿肥与氮肥配合施用对培肥地力和供肥性能的研究[J]. 土壤肥料, 1994(2):27-29.
- BAO Xing-guo, QIU Jin-huai, LIU Sheng-zhan, et al. Researching of green manure plus nitrogen fertilizer on soil fertility and fertilizer for the performance[J]. *Soil Fertility*, 1994(2):27-29.
- [31] 高菊生, 刘更另, 秦道株, 等. 红壤稻田不同轮作方式对水稻生长发育的影响[J]. 耕作与栽培, 2002, 2:1-2.
- GAO Ju-sheng, LIU Geng-ling, QIN Dao-zhu, et al. Effects of crops rotation on rice growth in red soil[J]. *Culture with Planting*, 2002, 2:1-2.
- [32] 蒋平, 荣湘民, 张富强, 等. 不同秸秆还土方式对旱地土壤培肥和玉米产量的影响[J]. 土壤肥料, 2004(3):7-10.
- JIANG Ping, RONG Xiang-min, ZHANG Fu-qiang, et al. Effects of increasing soil fertility and maize output by manure the maize straw with different returning ways to upland soil[J]. *Soil Fertility*, 2004(3):7-10.
- [33] 孙锐锋, 李剑, 肖厚军, 等. 绿肥与秸秆混合还土效果[J]. 贵州农业科学, 2007, 35(5):72-74.
- SUN Rui-feng, LI Jian, XIAO Hou-jun, et al. Effects of green manure and maize straw on maize yield, maize crude protein content and soil fertility[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2007, 35(5):72-74.
- [34] Ntanos D A, Koutroubas S D. Dry matter and N accumulation and translocation for indica and japonica rice under mediterranean conditions[J]. *Field Crops Res*, 2002, 74:93-101.