

DOI: 10.5846/stxb201604130676

马斌, 刘景辉, 杨彦明. 连续施用保水材料对旱作条件下土壤特性及燕麦生长的影响. 生态学报, 2017, 37(17): 5650-5661.

Ma B, Liu J H, Yang Y M, Zhao B P, Yuan M J, Mi J Z. Effects of continuous application of water-retaining materials on soil characteristics and oat (*Avena nuda* L.) growth under dry-farming conditions. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(17): 5650-5661.

连续施用保水材料对旱作条件下土壤特性及燕麦生长的影响

马 斌¹, 刘景辉^{1,*}, 杨彦明¹, 赵宝平¹, 袁梦君², 米俊珍¹

1 内蒙古农业大学, 内蒙古杂粮工程技术研究中心, 呼和浩特 010019

2 内蒙古大学, 呼和浩特 010021

摘要:以坝蓆一号为材料, 研究连续 4a 施用保水材料聚丙烯酰胺(PAM)与聚丙烯酸钾(PAM-K), 对旱作农田不同土层土壤微生物量变化与相应土层土壤含水量、容重、电导率、养分及燕麦生长的影响。结果表明, 旱区农田施用 PAM-K 和 PAM 的微生态效应存在时空差异, 以连续施用 4a 效果最佳, 其大小顺序表现为连续施用 4a>施用 3a>2a>1a>对照。连续施用 4a PAM-K 和 PAM, 0—60 cm 土层土壤含水量平均增加了 27.18%和 34.40%; 土壤容重、土壤电导率分别平均降低了 2.33%和 6.64%、29.50%和 22.70%; 相对显著增加了耕层土壤养分(有机质、碱解氮、有效磷、速效钾)含量; 土壤微生物生物量碳、氮、磷增幅平均达 24.11%、31.89%、46.52%和 69.96%、35.21%、52.70%, 尤其是连续施用 4a PAM, 10—20cm 土层土壤微生物量氮增幅达 98.95%及 0—10cm、20—40cm 土层土壤微生物生物量碳和土壤微生物量磷的增加最明显, 增幅分别达 31.13%和 74.49%、62.27%和 49.91%。连续施用 4a PAM-K 和 PAM, 植株鲜重、干重、株高、籽粒产量, 分别增加了 90.53%和 146.91%、101.56%和 128.13%、33.67%和 76.39%、19.27%和 22.40%。可见, 连续多年施用 PAM-K 和 PAM 对施入层(0—20 cm)和近施入层(20—40 cm)改善效果显著; PAM 对旱区土壤的适宜性优于 PAM-K, 可改善土壤质量, 提高作物产量。

关键词:保水材料; 土壤含水量; 土壤电导率; 土壤容重; 土壤养分; 土壤微生物量; 燕麦

Effects of continuous application of water-retaining materials on soil characteristics and oat (*Avena nuda* L.) growth under dry-farming conditions

MA Bin¹, LIU Jinghui^{1,*}, YANG Yanming¹, ZHAO Baoping¹, YUAN Mengjun², MI Junzhen¹

1 Inner Mongolia Cereal Engineering & Technology Research Center, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China

2 Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China

Abstract: A four-year experiment was conducted to investigate the effects of polyacrylamide (PAM) and potassium polyacrylate (PAM-K) application on the growth characteristics of oat (*Avena nuda* L.) and soil at different soil depths and in different years (2011, 2012, 2013, and 2014). The correlations between the growth characteristics of oat and soil microbial biomass, nutrients, moisture content, electrical conductivity, and bulk density at the respective soil layers in a dry land area of Inner Mongolia were also examined. PAM and PAM-K were applied at a rate of 75 kg/hm² per year. The experiment consisted of a total of 8 treatments and a control. The application groups were as follows: conventional tillage (CK), (1) M1: PAM 2011, (2) M2: PAM 2011 and 2012, (3) M3: PAM 2011, 2012, and 2013, (4) M4: PAM 2011, 2012, 2013, and 2014, (5) A1: PAM-K 2011, (6) A2: PAM-K 2011 and 2012, (7) A3: PAM-K 2011, 2012, and 2013, and (8) A4: PAM-K 2011, 2012, 2013, and 2014. This was a two-factor experiment involving a randomized

基金项目:国家自然科学基金项目(31160267); 国家科技支撑计划资助项目(2015BAD22B04); 全国农业科研杰出人才及其创新团队; 内蒙古自治区燕麦种质资源创新与利用科技创新团队(20140401); 国家现代农业产业技术体系(CARS-08-B-5)资助

收稿日期:2016-04-13; **网络出版日期:**2017-04-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cauljh@163.com

complete block design with three replications. Each treatment occupied a plot area of 4×5 m. Water-retaining materials were spread equally on the surface of the land and then incorporated into the soil by tilling. Oat seeds were sown on May 25 and harvested in late September during the four experimental years (2011, 2012, 2013, and 2014) at a rate of 3750000 plants per hectare with a row spacing of 25 cm and seeding depth of 3—5 cm. With increasing PAM and PAM-K application, differences in micro-ecological effects were observed at different times for the rain-fed farmland. The results showed the following superiority order: 4 years > 3 years > 2 years > 1 year. At a depth of 0—60 cm soil, compared with the control, for the treatments administered continuously for four years (A4 and M4), soil moisture increased by an average of 27.18% in A4 and 34.40% in M4. A decreasing trend was observed for soil bulk density and soil electrical conductivity; soil bulk density decreased by 2.33% and 6.64%, while soil conductivity reduced by an average of 29.50% and 22.70% for A4 and M4, respectively. Soil nutrient content (available P, N, and K, organic matter) increased in both A4 and M4. Microbial biomass carbon (MBC), nitrogen (MBN), and phosphorus (MBP) showed an increasing trend; MBC increased by an average of 24.11% in A4 and 31.89% in M4, MBN increased by 46.52% in A4 and 69.96% in M4, and SMBP increased by 35.21% in A4 and 52.70% in M4. Interestingly, at a depth of 10—20 cm, MBN increased by 98.95% in M4, while at 0—10 cm, MBC increased significantly by 31.13% and MBP increased by 74.49% in M4, respectively. At a depth of 20—40 cm, MBC increased significantly by 62.27%, while MBP increased by 49.91% in M4, respectively. Additionally, the oat seedling aboveground fresh biomass increased for A4 and M4 by 90.53% and 146.91%; aboveground dry biomass increased by 101.56% and 128.13%, plant height increased by 33.67% and 76.39%, and grain yield increased by 19.27% and 22.40%. Significant improvement was observed with continuous application of PAM and PAM-K in the plowing layer (0—20 cm) and near the application layer (20—40 cm). We recommend PAM treatment, which is more suitable for yellow loamy soil, than PAM-K treatments, to improve soil quality and increase crop yield in dry farming areas.

Key Words: water-retaining material; soil moisture content; soil electrical conductivity; soil bulk density; soil nutrient; soil microbial biomass; oat

目前,在干旱和半干旱地区,保水材料的使用已经显示了潜在的改善土壤理化性质及促进一些作物品种增长的效果,广泛应用于农业节水和生态恢复^[1]。保水材料可以提高土壤水分保持能力,稳定土壤结构,提高土壤渗透率,减少沟灌田水的使用、土壤养分流失及土壤侵蚀^[2-4];保持大量的土壤水分和养分,在植物所需时的释放^[5-7],减少作物生育期间灌水量^[8-9]。土壤微生物作为土壤养分循环的基础,参与土壤物质循环和能量转化之中,它促进土壤有机质的分解、腐殖质的形成及土壤养分循环和转换,是植物重要的养分来源^[10],其易受到土壤环境变化的影响^[11],而关于多年施用保水材料对土壤微生物量的研究较少^[1]。Azzam 研究证实保水材料可以促进种子萌发和出苗^[12]。Li 等室内研究表明施用保水材料有利于卷心菜的生长^[1]。Yazdani 等研究同样认为在干旱胁迫下,施用保水材料促进大豆生长,增加了生物产量^[13]。Busscher 等同样得出在美国东南海岸平原的深翻耕土壤,施用保水材料提高了沙质海岸平原作物产量^[14]。

可见,关于保水材料的研究大多集中在短期对作物生长及土壤理化性质方面的影响,本研究以旱作燕麦田土壤为研究对象,通过 4a 定位试验,探讨连续多年施用保水材料 PAM、PAM-K 对旱作农田作物生长、产量及不同土层土壤微生物量 C、N、P 的变化特征及其影响因子,分析 PAM、PAM-K 对作物鲜重、干重、产量及土壤微生物量的影响,为了解不同保水材料对该地区作物生长及土壤微生物碳氮磷的影响及其作用机制提供基础数据与科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地情况

试验于 2011—2014 年在内蒙古清水河县一间房村进行,该地区是长城沿线典型的旱作丘陵地区,丘陵山

地占 90% 以上,平均海拔 1374 m,年平均温度 7.1℃,≥10℃ 积温 2 370℃,无霜期 140 d,年日照时数为 2914 h,年平均大风日数达 19 d,年总辐射量为 570.6 kJ/cm²,年均降雨量 365 mm,年蒸发量 2577 mm,属典型的中温带半干旱大陆性季风气候。试验地土壤类型为黄绵土,其中总孔隙度为 43.65%,团聚体 118.80 mg/kg,土壤体积质量为 1.45 g/cm³,有机质含量 10.25 g/kg,碱解氮 45.10 mg/kg,速效磷 7.40 mg/kg,速效钾 123.80 mg/kg,pH 为 7.84。

1.2 试验材料

供试燕麦品种为‘坝莜一号’;供试两种保水材料由北京汉力森公司提供,属于高分子聚合物。聚丙烯酸钾(PAM-K)为淡黄色颗粒,分子量约 1000 万,密度为 1.09g/cm³,溶于水、乙醇和异丙醇等,300℃ 以上易分解;聚丙烯酰胺(PAM)为白色颗粒状,分子量约 2100 万,密度为 1.30 g/cm³,遇水膨胀,几乎不溶于有机溶剂,120℃ 以上易分解。PAM-K 和 PAM 分别含有农作物生长所需营养元素钾和氮,化学结构式如图 1 所示:

1.3 试验设计

试验于 2011 年开始,设 9 个处理,随机区组设计,重复 3 次,小区面积 4 m×5 m。其中对照(CK)不做任何处理,PAM-K 和 PAM 各处理于每年 5 月 25 日(即播种前)分别均匀撒施于小区表面(表 1),后进行旋耕,旋耕深度为 15 cm。供试作物燕麦机播,播量 150 kg/hm²,行距 25 cm,其它管理同大田。

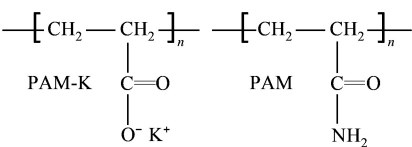


图 1 两种保水材料化学结构式

Fig.1 Chemical structure of Water-retaining materials

PAM-K: 聚丙烯酸钾 Potassium Polyacrylate; PAM: 聚丙烯酰胺 polyacrylamide

表 1 试验设计
Table 1 Experimental Design

处理 Treatments	试验材料 Experimental materials	每年施用量/(kg/hm ²) Application rate per year	施用年限 Application years
CK	不施	不施	不施
A1	PAM-K	75	只施入 1a(2011 年)
A2		75	连续施入 2a(2011 和 2012 年)
A3		75	连续施入 3a(2011、2012 和 2013 年)
A4		75	连续施入 4a(2011、2012、2013、2014 年)
M1		75	只施入 1a(2011 年)
M2		75	连续施入 2a(2011 和 2012 年)
M3		75	连续施入 3a(2011、2012 和 2013 年)
M4		75	连续施入 4a(2011、2012、2013、2014 年)

PAM-K: 聚丙烯酸钾 Potassium Polyacrylate; PAM: 聚丙烯酰胺 polyacrylamide

1.4 测定项目与方法

于 2014 年 6 月 15 日,燕麦苗期取土样及植物样,取 0—10、10—20、20—40、40—60、60—80、80—100 cm 土层土样进行土壤质量含水量(SMC)及土壤容重(SBD)的测定^[15]。取植株地上部分进行鲜重(AFB)、干重(ADB)、株高(plant height,PTH)的测定^[16]。用土钻随机钻取 0—10、10—20、20—40、40—60 cm 土层土壤样品,每个小区钻取五点,将土样混匀后带回实验室:一部分土壤自然风干后过 1 mm 筛,用于土壤化学性状指标的测定^[17]有机质用 K₂Cr₂O₇滴定法(SOM)、碱解氮用 NaOH-扩散法(N)、有效磷用 NaHCO₃-钼锑抗比色法(P)和速效钾用 NH₄OAc-火焰光度法(K),采用 DDB-11A 便携式电导率仪进行土壤电导率(SEC)的测定(土:水=1:5)。另一部分新鲜的土样去除其中动植物残体,通过 2 mm 筛,用去离子水调节土壤样品湿度至 40%田间持水量,于 25℃ 下黑暗培养 15 d,之后进行土壤微生物量的测定^[18],

(1)土壤微生物生物量碳 熏蒸提取-容量分析法。土壤微生物生物量碳(MBC)计算公式为:MBC=E_c/k_{EC},式中 E_c=熏蒸土样 TOC-未熏蒸土样 TOC,k_{EC}=0.38,单位以 mg/g 干土表示。

(2) 土壤微生物生物量氮 熏蒸提取-茚三酮比色法。土壤微生物生物量氮 (MBN) 计算公式为: $MBN = mE_{min-N}$, 式中 E_{min-N} = 熏蒸土样值 - 未熏蒸土样值, $m = 5.00$, 单位以 mg/g 干土表示。

(3) 土壤微生物生物量磷 熏蒸提取-全磷测定法。土壤微生物生物量磷 (MBP) 计算公式为: $MBP = E_{P_i} / k_p$, 式中 E_{P_i} = 熏蒸土样值 - 未熏蒸土样值, $k_p = 0.40$, 单位以 mg/g 干土表示。

燕麦产量 于 2014 年 9 月 20 日燕麦成熟后, 各小区随机选取 $1 m^2$ 测量籽粒及生物产量 (折算公顷产量), 计算穗粒数、千粒质量。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 和 SigmaPlot 10.0 进行绘图, 采用 SAS 9.0 统计分析软件对数据进行差异显著性检验及 R 3.3.1 软件进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 两种保水材料对土壤理化性质的影响

2.1.1 两种保水材料对土壤含水量的影响

从图 2 可知 0—10 cm 土层各处理 SMC 均在 8.5% 以下, 不同 PAM-K 和 PAM 处理条件下 SMC 较 CK 增幅为 -6.16%—25.93% 和 11.35%—37.76%, M4、M3、A4 处理保水持水能力显著高于 A2、A1 及 CK 处理 ($P < 0.05$); 10—20 cm 土层 SMC 为 8.91%—11.98%, 不同 PAM-K、PAM 处理均高于 CK, M4、M3、A4 和 A3 处理显著高于其他处理 ($P < 0.01$), 较 CK 增幅为 21.10%、19.12%、34.46% 和 15.31%; 20—40 cm 土层 SMC 为 9.23%—13.46%, M4、A4 处理较 CK 分别增加了 34.65% 和 45.82% ($P < 0.01$); 40—60 cm 土层 SMC 为 7.96%—11.12%, M4、A4 处理较 CK 分别增加了 25.68% 和 39.76%; 60—80, 80—100 cm 土层不同处理 SMC 均在 6.26% 和 5.90% 左右, 较为稳定。

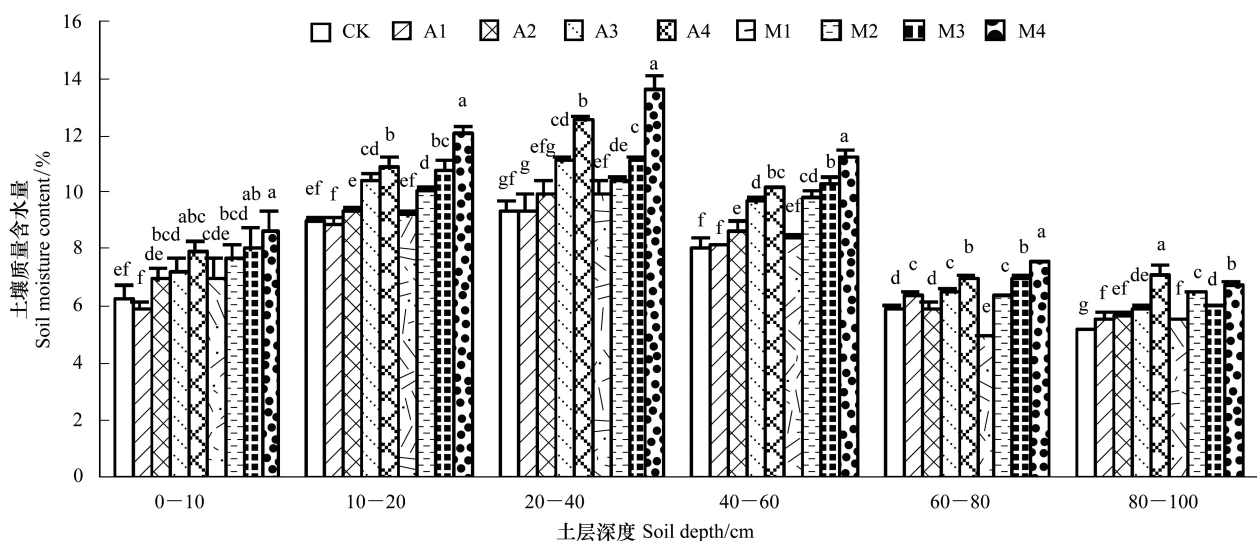


图 2 不同处理 0—100 cm 土层土壤质量含水量

Fig.2 Soil moisture content in 0—100 cm soil layers under different treatments

图中不同小写字母表示在 0.05 水平上的差异, 数据为平均值 $\pm$ 标准差 ($n=3$); CK: 不施保水材料 Without water-retaining material; A 和 M 分别代表 PAM-K 和 PAM, 数字 1、2、3 和 4 分别代表只施入 1a、连续 2a 施入、连续 3a 施入和连续 4a 施入

2.1.2 两种保水材料对土壤电导率的影响

PAM-K 和 PAM 处理下 SEC 均低于 CK, 其中 A4 和 M4 最优, 0—10 cm 土层分别较 CK 降低了 38.44% 和 13.36%; 10—20 cm 土层 SEC 分别比 CK 降低了 31.58% 和 34.41% ($P < 0.05$); 20—40 cm 土层 SEC 分别比 CK 降低了 26.93% 和 28.29% ($P < 0.05$); 40—60 cm 土层 SEC 分别比 CK 降低了 22.08% 和 28.09% ($P < 0.05$) (图 3)。

2.1.3 两种保水材料对土壤养分的影响

从图 4 可以看出,随着 PAM-K 和 PAM 施用年限的增加,各土层土壤有机质(SOM)、碱解氮(N)、有效磷(P)和速效钾(K)显著升高($P<0.05$),0—60 cm 土层土壤养分改善效果大小顺序为碱解氮>有机质>有效磷>速效钾。A4 和 M4 处理增幅最大,0—10 cm 土层碱解氮、有机质、有效磷、速效钾与 CK 比较,增幅分别为 44.14% 和 51.95%、38.06% 和 44.96%、30.34% 和 33.01%、33.94% 和 14.64%;10—20 cm 土层,升高幅度为 47.24% 和 56.61%、27.56% 和 30.62%、27.96% 和 18.93%、9.74% 和 5.48%;20—40 cm 土层升高幅度则为 16.45% 和 32.78%、21.20% 和 31.41%、27.70% 和 21.86%、8.97% 和 5.14%;40—60 cm 土层分别为 27.59% 和 54.94%、20.76% 和 31.61%、15.73% 和 31.29%、12.75% 和 11.53%。这表明,保水材料本身具有保肥的功能,可减少土壤养分过度损失^[2]。同时,PAM-K 与 PAM 中分别含作物所需的钾元素和氮元素,且每年施用量为 75 kg/hm²折合 5 kg/667m²,这也是连续四年施用 PAM-K 与 PAM 能显著增加土壤养分的原因之一。

2.1.4 两种保水材料对土壤容重的影响

由表 2 可知,9 个处理播前 SBD 均低于收获后,这是由于经过一个生育时期,在其自身重力及其它因素的作用下,SBD 显著增加,但是经过冬春休闲期,在冻融及生物作用影响下,SBD 有所下降^[19]。PAM-K、PAM 各处理在 0—100 cm 土层 SBD 表现一致,随着土层深度的增加呈升-降-升的“N”型变化,表现为:0—10 cm<10—20 cm<60—80 cm<80—100 cm<40—60 cm<20—40 cm。以 10—20 cm 土层为例,CK 处理 SBD 为 1.57 g/cm³,显著高于 M4、M3、M2、M1、A4、A3 及 A2 处理,与 A1 处理无显著差异,不同处理(PAM-K、PAM)均低于 CK,降幅为 3.99%—14.20%。说明 PAM-K、PAM 减小了 SBD,有利于根系的生长,对土壤培肥具有重要作用^[19-21]。

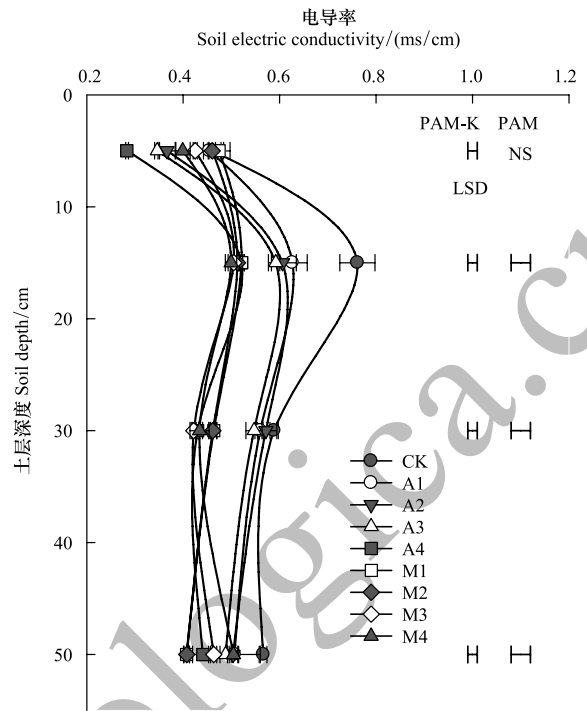


图 3 不同处理下 0—60 cm 土层土壤电导率
Fig.3 Soil electric conductivity in 0—60 cm soil layers under different treatments
NS: 不显著 no significant

表 2 不同处理不同土层的土壤容重

Table 2 Soil bulk density at different soil layers under different treatments

土层深度 Soil depth/cm		0—10	10—20	20—40	40—60	60—80	80—100
播前土壤容重/(g/cm ³) Soil bulk density before sowing		1.43	1.56	1.57	1.50	1.49	1.51
收获期土壤容重/(g/cm ³) Harvest time soil bulk density	CK	1.51±0.11a	1.57±0.02a	1.56±0.06a	1.50±0.07a	1.54±0.02a	1.55±0.02a
	A1	1.50±0.08a	1.50±0.05ab	1.56±0.10a	1.51±0.02a	1.50±0.02ab	1.51±0.06ab
	A2	1.49±0.10a	1.49±0.03ab	1.55±0.08a	1.50±0.07a	1.48±0.06bcd	1.51±0.03ab
	A3	1.48±0.09a	1.52±0.03ab	1.54±0.02a	1.50±0.02a	1.47±0.04bcd	1.50±0.04ab
	A4	1.47±0.07a	1.50±0.05b	1.53±0.02a	1.49±0.02a	1.44±0.04cd	1.50±0.07abc
	M1	1.50±0.15a	1.52±0.03ab	1.55±0.07a	1.52±0.02a	1.51±0.02ab	1.51±0.02ab
	M2	1.41±0.11a	1.47±0.02bc	1.55±0.02a	1.50±0.03a	1.49±0.03abc	1.49±0.02abc
	M3	1.38±0.13a	1.43±0.04cd	1.51±0.02a	1.50±0.03a	1.44±0.02cd	1.45±0.02bc
	M4	1.34±0.12a	1.40±0.03d	1.51±0.06a	1.47±0.03a	1.42±0.02d	1.43±0.03c

表中同列不同小写字母表示在 0.05 水平上的差异

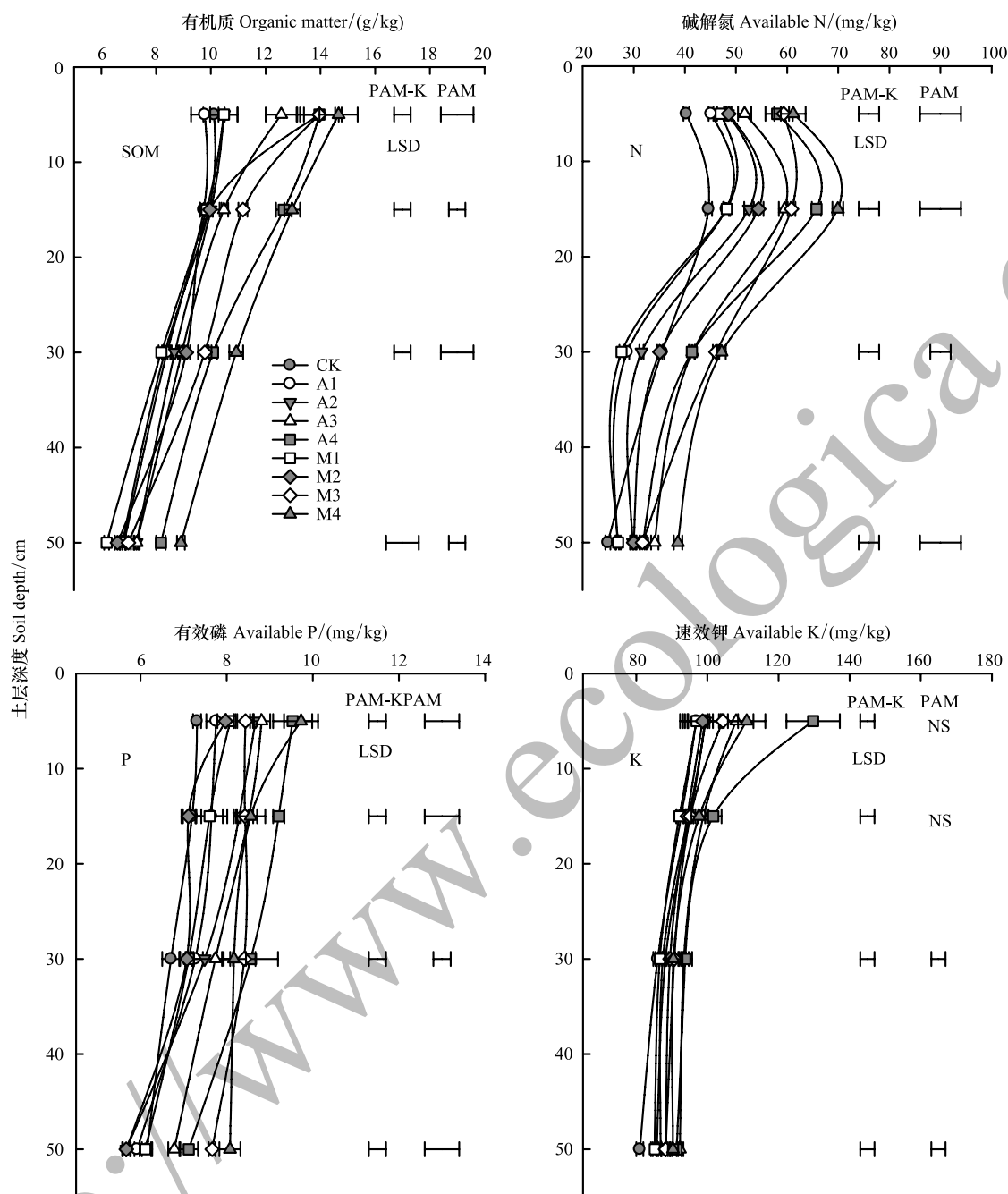


图4 不同处理下0—60 cm 土层土壤养分

Fig.4 Soil nutrients in 0—60 cm soil layers under different treatments

2.2 两种保水材料对土壤微生物量的影响

2.2.1 两种保水材料对土壤微生物量碳的影响

图5所示,0—60 cm 范围内,随着土层深度的增加,各处理土壤微生物量碳(MBC)呈现“V”型曲线规律,其中0—10、10—20、40—60 cm 土层 MBC 显著高于20—40 cm 土层。0—60 cm 土层,随着施用年限的增加呈现增加的趋势,与CK相比,施用PAM-K、PAM可以显著提高MBC。其中0—10 cm 土层M4、M3、A4处理显著高于M2、A2、M1、A1和CK处理,PAM-K及PAM处理分别较CK提高了3.85%—18.21%和1.94%—31.13%;10—20 cm 土层、20—40 cm 土层及40—60 cm 土层均为M4处理最优,增幅为26.88%、62.27%和17.32%。可见施用PAM, PAM-K的年限不同,对不同土层MBC的影响存在一定的差异,对0—10 cm 与20—40 cm 土层

的改善作用显著高于 10—20 cm 与 40—60 cm 土层。总体看,连续 4a>连续 3a>连续 3a>1a,PAM 处理优于 PAM-K 处理,但都提高了 MBC 对调节土壤环境和土壤碳储存的作用^[22],增加了土壤有机质中易变化且活性高的部分,促进了养分的有效化,对土壤肥力和植物营养提供了重要的养分来源^[23-24]。

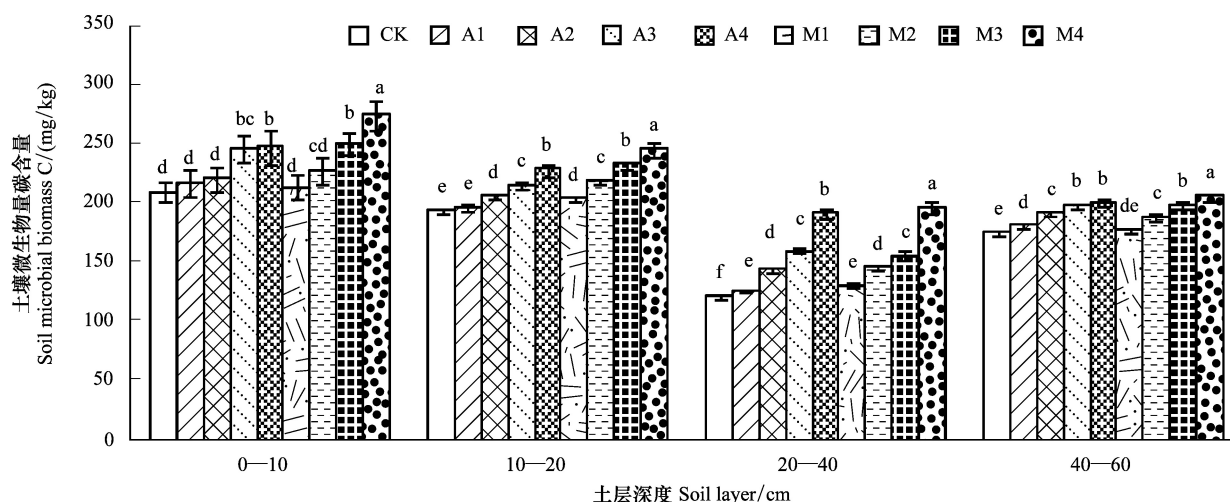


图 5 不同处理不同土层的土壤微生物量碳

Fig.5 Soil microbial biomass C at different soil layers under different treatments

2.2.2 两种保水材料对土壤微生物量氮的影响

分析图 6 可知,0—60 cm 范围内,随着土层深度的增加,各处理土壤微生物量氮(MBN)呈先上升后下降的趋势(CK 除外),0—10、10—20、20—40 cm 土层,MBN 显著高于 40—60 cm 土层。0—60 cm 土层,随着施用年限的增加 MBN 呈现增加的趋势,不同施用年限 PAM-K、PAM 处理对 MBN 影响不同,以 10—20cm 土层为例,MBN 表现为 M4>A4>M3>A3>M2>A2>M1>A1>CK,A4 与 M4 显著高于其他处理,与 CK 相比增幅为 90.49%和 98.95%。可见施用 PAM-K、PAM 促进了土壤微生物对有机氮矿化与固持作用,增加了土壤的活性氮“库”和“源”^[25-26],对 0—20 cm 土层 MBN 改善作用最明显,犁底层(20—40 cm)、心土层(40—60 cm)改善效果依次减小,但也有显著的改善效果,以 M4 效果最佳。

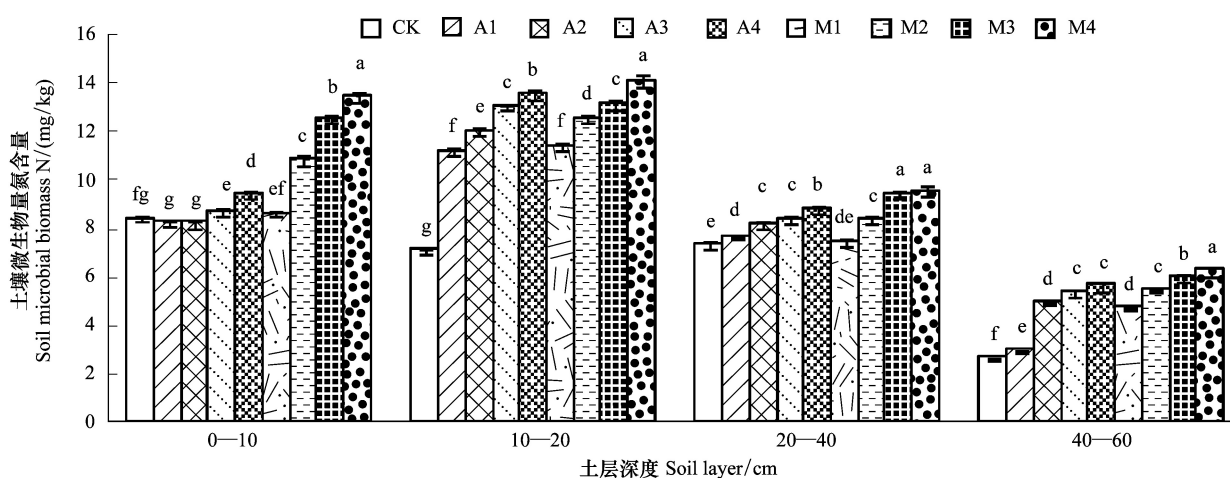


图 6 不同处理不同土层的土壤微生物量氮

Fig.6 Soil microbial biomass N at different soil layers under different treatments

2.2.3 两种保水材料对土壤微生物量 P 的影响

土壤微生物量磷(MBP)是土壤有机磷中较活跃的部分,通过生物量磷释放的磷对作物生长相当重要,它

与土壤微生物量碳、氮一样受环境因素影响很大^[27]。如图 7 所示,随土层深度的增加各处理 MBP 呈下降的趋势,40—60 cm 土层显著低于其他土层。0—60 cm 土层,随着施用年限的增加 MBP 呈增加的趋势,PAM-K、PAM 处理均优于 CK。其中 0—10 cm 土层为 M4 处理显著高于其他处理,A1 和 CK 处理差异不显著,PAM-K、PAM 处理分别较 CK 提高了 1.76%—52.04% 和 15.38%—74.49%。MBP 周转速度快,是提供作物有效磷的重要来源,因此施用 PAM-K、PAM 具有促进作物生长的作用,同时 PAM-K、PAM 也促进了 0—20 cm 土层 MBP 对于调控土壤磷的植物有效性及磷的生物地球化学循环的重要作用^[26,28-31]。

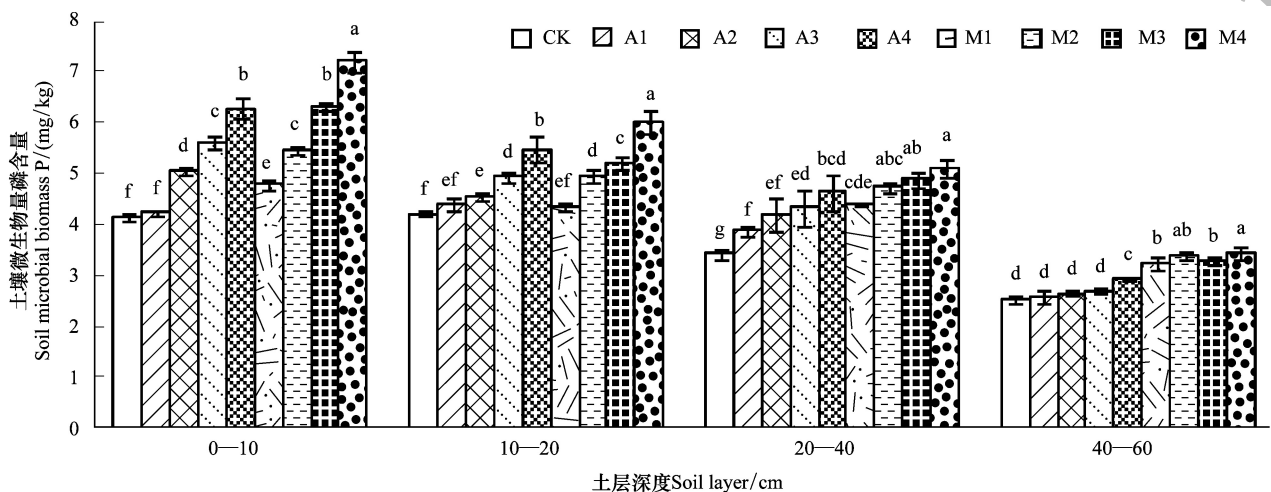


图 7 不同处理不同土层的土壤微生物量磷

Fig.7 Soil microbial biomass P at different soil layers under different treatments

2.3 两种保水材料对燕麦生长特性的影响

2.3.1 两种保水材料对燕麦鲜干重及株高的影响

从图 8 可见,不同 PAM-K、PAM 处理条件下 AFB 均高于 CK 处理,分别较 CK 提高了 0.00%、14.81%、36.01%、90.53%、72.02%、94.24%、127.98% 和 146.91%; ADB 分别比 CK 提高了 -6.25%、9.38%、15.63%、101.56%、76.56%、84.38%、128.13% 和 123.59%。显著性分析结果表明,M4、M3 处理的 AFB 显著高于其他处理,M2、A4、M1 处理显著高于 A3、A2、A1、CK 处理,A3 处理显著高于 A1、CK,A2、A1 及 CK 处理间差异不显著。从图 9 可知,不同 PAM-K、PAM 处理下株高均高于 CK 处理,增幅为 5.18%、11.72%、12.24%、33.67%、27.72%、28.76%、32.98% 和 76.39%,以 A4 和 M4 处理的燕麦株高增长最快,植株最高。

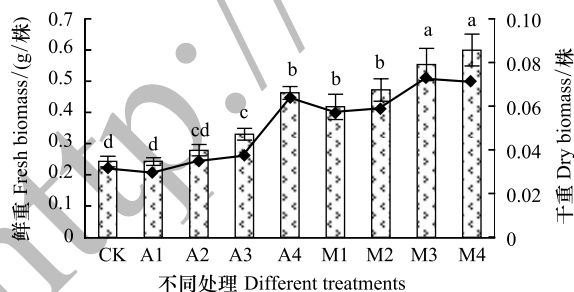


图 8 不同处理下燕麦地上部分鲜干重

Fig.8 Oat aboveground fresh and dry biomass under different treatments

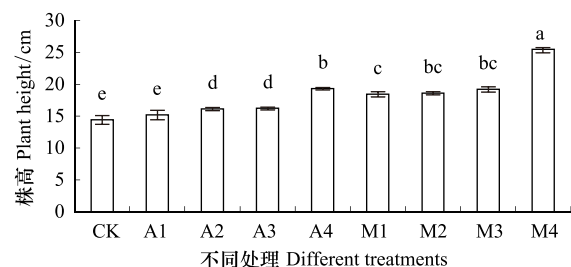


图 9 不同处理下燕麦株高

Fig.9 Oat plant height under different treatments

2.3.2 两种保水材料对燕麦产量及其构成因素的影响

由表 3 可见,保水材料对燕麦群体穗数、穗粒数、千粒重及生物产量均产生了明显的影响。各处理籽粒产

量表现为:M4>A4>M3>A3>M2>M1>A2>A1>CK,较 CK 增加 2.56%—22.40%,从产量构成因素来看,M4 处理的穗数及千粒重分别为 $292.56\times10^4/\text{hm}^2$ 、23.18 g,均为最高。总体上看:PAM、PAM-K 仅施用 1a,即可增产,增产效果以 PAM 最佳;连续施用 2、3、4a,增产效果不断提高。同时发现,PAM、PAM-K 仅施用 1a 各处理与 CK 相比,优势已不显著。

表 3 不同施用年限各处理燕麦产量及其构成因素的变化

Table 3 Changes of different application period treatments on oat yield and its components

处理 Treatments	穗数 Ear number/ ($10^4/\text{hm}^2$)	穗粒数 Seed number/ 粒	千粒重 Thousand kernel weight/g	籽粒产量 Grain yield/ (kg/hm^2)	生物产量 Biomass yield/ (kg/hm^2)
A1	275.56a	53.93ab	20.05c	2883.39cd	9032.17b
A2	280.05a	55.22ab	20.75bc	3052.26bcd	9294.5ab
A3	289.49a	56.05ab	21abc	3143.91abcd	9460.68ab
A4	290.85a	57.41a	21.28abc	3353.18ab	10440.16a
M1	272a	53.63ab	21.4abc	3061.46bcd	9553.57ab
M2	280a	54.49ab	22.38ab	3074abcd	9619.21ab
M3	284.94a	56.31a	22.98a	3219.41abc	9944.93ab
M4	292.56a	57.91a	23.18a	3441.32a	10304.64a
CK	263.12a	50.48b	19.55c	2811.43d	8856.17b

2.4 PAM 和 PAM-K 施用与燕麦生长特性及土壤理化性质之间的相关性

将燕麦籽粒产量与代表性最强的 10—20 cm 土层 A4 和 M4 处理土壤养分、含水量、容重、电导率、土壤微生物量 C、微生物量 N 和微生物量 P 进行相关性分析,结果如图 10 所示。作物产量与土壤性状相关性分析可以看出,A4 中 P、SOM、MBC、K 及 SEC 的相关性,与 M4 中 N、MBC、K、SOM 及 SBD(按相关系数大小排序)的相关性,明显高于 CK。微生物量与土壤性状相关性分析看出,A4 中 MBP 与 SEC 和 SBD 相关性高于 CK,M4 中 MBC 和 MBN 与 SBD 的相关性高于 CK。

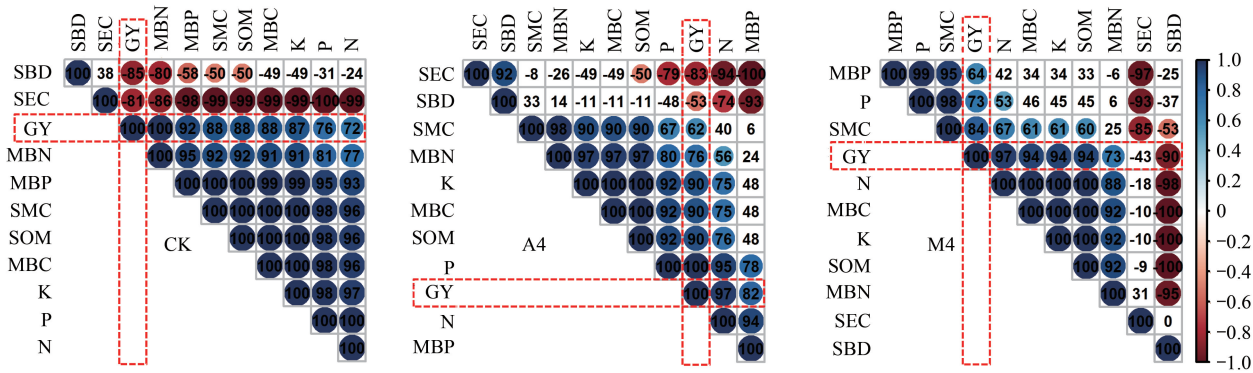


图 10 不同处理下燕麦产量及土壤理化性质之间的相关性

Fig.10 Correlation analysis of grain yield and soil physical-chemical properties under different treatments

SOM: 有机质 soil organic matter;N: 碱解氮 available N;P: 有效磷 available P;K: 速效钾 available K;MBC: 微生物量碳 soil microbial biomass C;MBN: 微生物量氮 soil microbial biomass N;MBP: 微生物量磷 soil microbial biomass P;SMC: 土壤含水量 soil moisture content;SBD: 土壤容重 soil bulk density;EC: 土壤电导率 soil electrical conductivity;GY: 籽粒产量 grain yield;彩色圆圈表示相关性($P < 0.05$)

3 讨论

大量研究表明,保水材料具有超强吸水 and 保水的能力,施用当年能显著提高土壤水分保持能力^[13,32-34]。本试验进一步研究表明,连续多年施用 PAM 和 PAM-K 能够显著提高施入层(0—20 cm)和近施入层(20—

60 cm) 土层 SMC, 且随着土层深度增加, 受 PAM-K 和 PAM 影响减弱, 但连续多年施用对远施入层 (60—100 cm) 土壤水分也有一定的影响。这是由于 PAM 和 PAM-K 本身具有高吸水性和保水性^[35], 也可能是由于其改善了黄绵土土壤质量, 提高了旱作农田土壤保水和持水能力^[36]。

施用不同年限 PAM-K 和 PAM 后, 0—60 cm 土层 SEC 均有所减小, 其原因可能是施用保水材料能有效降低土壤含盐量^[36-37], 也可能是由于 SEC 受土壤水分运移特征的影响^[38], 施用 PAM-K 和 PAM 改变了 0—60 cm 土壤含水量, 二者综合作用的结果。

施用 PAM-K 和 PAM, 降低施入层 (0—20 cm) 和近施入层 (20—60 cm) 土壤容重, 与韩凤鹏等^[39] 研究结果相同。其原因一方面是 PAM-K 和 PAM 是一种线型水溶性高分子聚合物, 分子量较大, 分子链扩展较宽, 具有增稠性、粘合性、絮凝性等特点, 能够改善 0—60 cm 土壤物理结构, 另一方面施用 PAM-K 和 PAM 增加 0—60 cm 土壤有机质, 改善了土壤的物理性状^[40], 降低 0—60 cm 土壤容重。

马海林等研究表明保水剂可显著提高侧柏容器苗根际 MBC 和 MBN, 改善侧柏根际土壤微生态环境^[41]。连续多年施用 PAM-K、PAM 能显著增加 MBC、MBN 和 MBP, 这可能是 PAM-K 通过降低 SEC 和 SBD, 提高 MBP; PAM 通过降低 SBD, 提高 MBC 和 MBN。其对土壤环境因子产生微小的改变, 为土壤微生物提供了适宜的繁殖条件而导致土壤微生物量的变化^[42], 这也进一步表明保水材料对提高 SMC 及减小 SBD、SEC 有着重要的生态学意义。

本研究发现, PAM-K 和 PAM 处理对改善 10—20 cm 土层 MBN 有显著的作用, 其可能由于表土层 (0—10 cm) 影响因素大于稳定层 (10—20 cm), 因此改善效果没有稳定层 (10—20 cm) 改善效果显著, 也可能由于 PAM-K、PAM 主要施入 0—15 cm 土层, 因此对 10—20 cm 土层改善作用最显著; 而连续多年施用 PAM 和 PAM-K 对 SMBC 和 SMBP 的影响主要集中在 0—10 cm 及 20—40 cm 土层, 出现了交替影响的现象, 需要进一步研究。

本研究中 40—60 cm 土层 M4 和 A4 处理 SMBN 最高可达 6.25 g/kg 和 5.60 g/kg, 较 CK 提高了 133.27% 和 109.01%, 可能是由于土壤自身质量差, 连续 4a 施用 PAM 和 PAM-K 后 40—60 cm 土层 SMBN 改善显著。此外, 连续多年施用 PAM 和 PAM-K 对 SMBP 的影响优于对 SMBC 及 SMBN 影响, 这可能是由于 PAM-K、PAM 具有减小土壤板结程度的作用^[43], 而本研究也表明在旱作地区 SBD 是影响 SMBP 的关键因子, 这进一步说明 PAM 和 PAM-K 改善旱作农业地区 SBD 的重要作用。

本研究中施用保水材料能够显著提高燕麦植株鲜重、干重、株高和产量, 这与前人的研究结果相一致^[1, 6, 32-34]。推测其原因, 可能是由于 PAM-K 通过提高 P、SOM、MBC 和 K, 增加 0—60 cm 土层土壤养分及减小 0—60 cm 土层 SEC, 减缓了旱作农业地区土壤降雨后地表形成结皮或结壳, 使土壤透气性和可耕性得到改善^[38, 44], 为作物生长发育提供更佳的土壤环境条件; PAM 通过提高 0—60 cm 土壤 N、MBC、K 和 SOM 及减小了土壤施入层 (0—20 cm) 和近施入层 (20—60 cm) SBD, 有利于土壤水分的保持和运输, 有效地缓解了土壤紧实对作物生长的障碍^[45-46]。同时, PAM-K 和 PAM 本身含有的营养元素, 也影响了土壤养分和植株生长状况, 进而促进作物产量的形成^[20, 40, 47]。

4 结论

连续多年施用 PAM-K 和 PAM 能明显增加 0—60 cm 土层旱作燕麦田土壤水分、降低土壤容重和电导率, 进而提高土壤养分, 改善土壤微生态环境, 有利于微生物量 C、N、P 增加, 促进了作物生长, 达到增产的累积效应, 尤其是对 10—20 cm 土层微生物量 N 及 0—10、20—40 cm 土层微生物量 C、微生物量 P 的增加显著, 降低施入层 (0—20 cm) 和近施入层 (20—60 cm) 土壤容重与电导率, 其作用效果为连续施用 4a>连续 3a>连续 2a>仅 1a>对照, 并以 PAM 的效果优于 PAM-K。因此, 建议旱作农业地区应用聚丙烯酰胺作为土壤改良剂, 并且连续施用多年, 以达到改良土壤, 使贫瘠干旱土壤地区丰收的目的, 实现我国中低产田农业的可持续发展。

参考文献 (References):

- [1] Li X, He J Z, Liu Y R, Zheng Y M. Effects of super absorbent polymers on soil microbial properties and Chinese cabbage (*Brassica chinensis*) growth. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, 13(4): 711-719.
- [2] Lentz R D, Sojka R E, Robbins C W. Reducing phosphorus losses from surface-irrigated fields: Emerging polyacrylamide technology. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27(2): 305-312.
- [3] Ajwa H A, Trout T J. Polyacrylamide and Water Quality Effects on Infiltration in Sandy Loam Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 70(2): 643-650.
- [4] Tümsavaş Z, Kara A. The effect of polyacrylamide (PAM) applications on infiltration, runoff and soil losses under simulated rainfall conditions. *African Journal of Biotechnology*, 2011, 10(15): 2894-2903.
- [5] Mikkelsen R L. Using hydrophilic polymers to control nutrient release. *Fertilizer research*, 1994, 38(1): 53-59.
- [6] Mao S S, Islam M R, Xue X Z, Yang X C, Zhao X B, Hu Y G. Evaluation of a water-saving superabsorbent polymer for corn (*Zea mays* L.) production in arid regions of Northern China. *African Journal of Agricultural Research*, 2011, 6(17): 4108-4115.
- [7] Yu J, Shi J G, Dang P F, Mamedov A I, Shainberg I, Levy G J. Soil and polymer properties affecting water retention by superabsorbent polymers under drying conditions. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(5): 1758-1767.
- [8] Flannery R L, Busscher W J. Use of a synthetic polymer in potting soils to improve water holding capacity. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1982, 13(2): 103-111.
- [9] Taylor K C, Halfacre R G. The effect of hydrophilic polymer on media water retention and nutrient availability to *Ligustrum lucidum*. *HortScience*, 1986, 21(5): 1159-1161.
- [10] Li Z P, Wu X C, Chen B Y. Changes in Transformation of soil organic C and functional diversity of soil microbial community under different land uses. *Agricultural Sciences in China*, 2007, 6(10): 1235-1245.
- [11] Guo J F, Chen G S, Xie J S, Yang Z J, Yang Y S. Effect of heat-disturbance on microbial biomass carbon and microbial respiration in Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) forest soils. *Journal of Forestry Research*, 2015, 26(4): 933-939.
- [12] Azzam R A I. Polymeric conditioner gels for desert soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1983, 14(8): 739-760.
- [13] Yazdani F, Allahdadi I, Akbari G A. Impact of superabsorbent polymer on yield and growth analysis of soybean (*Glycine max* L.) under drought stress condition. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 2007, 10(23): 4190-4196.
- [14] Busscher W J, Bjorneberg D L, Sojka R E. Field application of PAM as an amendment in deep-tilled US southeastern coastal plain soils. *Soil and Tillage Research*, 2009, 104(2): 215-220.
- [15] 吕贻忠, 李保国. 土壤学. 北京: 中国农业大学出版社, 2006: 16-62.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析 (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-108.
- [17] 史树德, 孙亚卿, 魏磊. 植物生理学实验指导. 北京: 中国林业出版社, 2011: 11-12.
- [18] 吴金水. 土壤微生物生物量测定方法及其应用. 北京: 气象出版社, 2006: 54-79.
- [19] Yang Z P, Xu M G, Zheng S X, Nie J, Gao J S, Liao Y L, Xie J. Effects of long-term winter planted green manure on physical properties of reddish paddy soil under a double-rice cropping system. *Journal of Integrative Agriculture*, 2012, 11(4): 655-664.
- [20] Merrill S D, Rawlins S L. Distribution and growth of sorghum roots in response to irrigation frequency. *Agronomy Journal*, 1978, 71(5): 738-745.
- [21] Tracy S R, Black C R, Roberts J A, Mooney S J. Soil compaction: a review of past and present techniques for investigating effects on root growth. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2011, 91(9): 1528-1537.
- [22] Jia G M, Liu B R, Wang G, Zhang B L. The microbial biomass and activity in soil with shrub (*Caragana korshinskii* K.) plantation in the semi-arid loess plateau in China. *European Journal of Soil Biology*, 2010, 46(1): 6-10.
- [23] Han L, Zhang Y L, Jin S, Wang J, Wei Y Y, Gui N, Wei W. Effect of different irrigation methods on dissolved organic carbon and microbial biomass carbon in the greenhouse soil. *Agricultural Sciences in China*, 2010, 9(8): 1175-1182.
- [24] Huang J Y, Song C C. Effects of land use on soil water soluble organic C and microbial biomass C concentrations in the Sanjiang Plain in Northeast China. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B- Soil & Plant Science*, 2010, 60(2): 182-188.
- [25] 焦晓光, 魏丹, 隋跃宇. 长期培肥对农田黑土土壤微生物量碳、氮的影响. *中国土壤与肥料*, 2010, (3): 1-3.
- [26] 仇少君, 彭佩钦, 刘强, 荣湘民. 土壤微生物生物量氮及其在氮素循环中作用. *生态学杂志*, 2006, 25(4): 443-448.
- [27] 王岩, 沈其荣, 史瑞和, 黄东迈. 土壤微生物量及其生态效应. *南京农业大学学报*, 1996, 19(4): 45-51.
- [28] 何振立. 土壤微生物量及其在养分循环和环境质量评价中的意义. *土壤*, 1997, (2): 61-69.
- [29] Chen G C, He Z L, Huang C Y. Microbial biomass Phosphorus and its significance in predicting Phosphorus availability in red soils.

- Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2000, 31(5/6): 655-667.
- [30] Frossard E, Condon L M, Oberson A, Sinaj S, Fardeau J C. Processes governing phosphorus availability in temperate soils. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(1): 15-23.
- [31] Oberson A, Friesen D K, Rao I M, Bühler S, Frossard E. Phosphorus transformations in an Oxisol under contrasting land-use systems: the role of the soil microbial biomass. *Plant and Soil*, 2011, 237(2): 197-210.
- [32] Islam M R, Hu Y G, Fei C, Qian X, Egrinya A E, Xue X Z. Application of superabsorbent polymer: A new approach for wheat (*Triticum aestivum* L.) production in drought-affected areas of northern China. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 2011, 9(1): 304-309.
- [33] Karimi A, Noshadi M, Ahmadzadeh M. Effects of super absorbent polymer (Igeta) on crop, soil water and irrigation interval. *Journal of Water and Soil Science*, 2009, 12(46): 403-414.
- [34] Islam M R, Xue X Z, Mao S S, Ren C Z, Eneji A E, Hu Y G. Effects of water-saving superabsorbent polymer on antioxidant enzyme activities and lipid peroxidation in oat (*Avena sativa* L.) under drought stress. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2011, 91(4): 680-686.
- [35] 冯雪, 潘英华, 张振华, 谢恒星. PAM 对土壤蒸发的影响分析及其模拟研究. *农业系统科学与综合研究*, 2008, 24(1): 49-52.
- [36] 王全九, 张继红, 谭帅. 微咸水入渗下施加 PAM 土壤盐运移特性研究. *土壤学报*, 2016, 53(4): 1056-1064.
- [37] 刘易, 冯耀祖, 黄建, 王新勇, 祁通, 孟阿静. 微咸水灌溉条件下施用不同改良剂对盐渍化土壤盐分离子分布的影响. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(1): 146-152.
- [38] 尤全刚, 薛娟, 黄翠华. 地下水深埋区咸水灌溉对土壤盐渍化影响的初步研究——以民勤绿洲为例. *中国沙漠*, 2011, 31(2): 302-308.
- [39] 韩凤朋, 郑纪勇, 李占斌, 张兴昌. PAM 对土壤物理性状以及水分分布的影响. *农业工程学报*, 2010, 26(4): 70-74.
- [40] Albaladejo J, Lopez J, Boix-Fayos C, Barbera G G, Martinez-Mena M. Long-term effect of a single application of organic refuse on carbon sequestration and soil physical properties. *Journal of Environmental Quality*, 2007, 37(6): 2093-2099.
- [41] 马海林, 刘方春, 马丙尧, 杜振宇, 井大炜, 邢尚军. 保水剂对侧柏容器苗根际土壤微生物种群结构及干旱适应能力的影响. *应用与环境生物学报*, 2016, 22(1): 43-48.
- [42] 刘恩科, 赵秉强, 李秀英, 姜瑞波, 李燕婷, So H B. 长期施肥对土壤微生物量及土壤酶活性的影响. *植物生态学报*, 2008, 32(1): 176-182.
- [43] Tan X, Chang S X, Kabzems R. Soil compaction and forest floor removal reduced microbial biomass and enzyme activities in a boreal aspen forest soil. *Biology & Fertility of Soil*, 2008, 44(3): 471-479.
- [44] Tedeschi A, Dell'Aquila R. Effects of irrigation with saline waters, at different concentrations, on soil physical and chemical characteristics. *Agricultural Water Management*, 2005, 77(1/3): 308-322.
- [45] Zimmerman R P, Kardos L T. Effect of bulk density on root growth. *Soil Science*, 1961, 91(4): 280-288.
- [46] Kar S, Varade S B, Subramanyam T K, Ghildyal B P. Soil physical conditions affecting rice root growth: Bulk density and submerged soil temperature regime effects. *Agronomy Journal*, 1976, 68(1): 23-26.
- [47] Haynes R J, Naidu R. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: A review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, 51(2): 123-137.