

纳米碳对关中地区土壤水分养分和小麦生长的影响

胡梓超^{1,3}, 周蓓蓓¹, 陈晓鹏¹, 彭 遥¹, 王全九^{1,2}

(1. 西安理工大学水利水电学院, 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710048;
2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;
3. 云南省水利水电勘测设计研究院, 云南 昆明 650021)

摘 要: 通过在冬小麦田表层 5~10 cm 条施(宽 5 cm×长 100 cm)纳米碳(质量含量分别为 0、0.001、0.005、0.007、0.010 kg·kg⁻¹), 研究了纳米碳对农田土壤水分、养分、冬小麦生长发育以及其产量的影响。结果表明: 农田土壤条施纳米碳后, 冬小麦根系层土壤水分含量增加, 深层土壤含水量降低, 且土壤水分分布波动减小, 其中纳米碳质量含量为 0.007 kg·kg⁻¹ 和 0.010 kg·kg⁻¹ 的小区从冬小麦幼苗期到灌浆期 5~10 cm 土壤深度内土壤平均含水量与对照组相比分别增加了 4.5% 和 6.8%; 纳米碳在冬小麦各生育期内均可以有效提高小麦田间土壤剖面吸持养分的能力, 且同一生育期内, 纳米碳含量越高, 土壤表层剖面养分浓度越大, 其中纳米碳质量含量为 0.007 kg·kg⁻¹ 和 0.010 kg·kg⁻¹ 的小区在灌浆期 5~10 cm 土壤深度内平均硝态氮、速效磷、速效钾含量与对照组相比分别增加了 25%、33.6%、43.7%、51.3%、6.6%、17.5%; 冬小麦茎粗、叶面积与生物量大体上与施用纳米碳的含量成正相关, 其中纳米碳质量含量为 0.007 kg·kg⁻¹ 和 0.010 kg·kg⁻¹ 的处理对冬小麦生长发育过程的影响最为显著, 产量与对照组相比分别增加了 2.4% 和 3.5%。

关键词: 纳米碳; 冬小麦; 土壤水分; 土壤养分; 生长发育; 产量

中图分类号: S152.7; S512.1 **文献标志码:** A

Effects of Nano carbon on the soil moisture and nutrient and the growth of wheat in Guanzhong region

HU Zichao^{1,3}, ZHOU Beibei¹, CHEN Xiaopeng¹, PENG Yao¹, WANG Quanjiu^{1,2}

(1. Xi'an University of Technology, Conservancy and Hydropower College, State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an, Shaanxi 710048, China;
2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Losses Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
3. Yunnan Institute of Water & Hydropower Engineering Investigation, Design and Research, Kunming, Yunnan 650021, China)

Abstract: By belt application of different Nano carbon contents (0, 0.001, 0.005, 0.007 kg·kg⁻¹ and 0.010 kg·kg⁻¹) at surface soil layer of 5~10 cm in the winter wheat field, we analyzed the effects of nano carbon on soil moisture and nutrient, winter wheat growth process and yield. The results showed that belt application of nano carbon in the soil could increase soil moisture content in root layer of winter wheat, reduced the moisture content of deep soil and decrease the fluctuation of soil water distribution. Compared with the control group from winter wheat seedling stage to grain filling stage in 5~10 cm soil depth, the test zones with 0.007 kg·kg⁻¹ and 0.010 kg·kg⁻¹ in gravity nano carbon contents increased the average soil water content by 4.5% and 6.8%, respectively. Nano carbon effectively improved the wheat field soil's retention of nutrients in different growth stages of winter wheat, and in the same growth period, the nutrient concentration of surface soil increased with the increase of Nano carbon contents. And compared with the control group during winter wheat grain filling stage in 5~10 cm soil depth, the test zones with 0.007 kg·kg⁻¹ and 0.010 kg·kg⁻¹ in gravity nano carbon contents increased the average nitrate nitrogen by 25% and 33.6%, average available phosphorus by 43.7% and 51.3%, and average available potassium by 6.6% and 17.5%, respectively. The stem diameter, leaf area and biomass of winter wheat were generally positively correlated with nano carbon contents in the whole

收稿日期: 2016-09-28 修回日期: 2017-02-27
基金项目: 国家自然科学基金项目(51239009); 陕西省科技支撑项目(2013KJXX-38); 陕西省自然科学基金(2015JQ 5161)
作者简介: 胡梓超(1990—), 男, 山西太原人, 硕士研究生, 研究方向为农业水土资源与生态环境。E-mail: 413662964@qq.com。
通信作者: 周蓓蓓(1982—), 女, 江苏徐州人, 博士, 副教授, 主要从事农业水土与生态环境研究。E-mail: happyangle222@gmail.com。

growth period of winter wheat, and the test zones with $0.007\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $0.010\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ in gravity nano carbon contents on the growth and development process of winter wheat is the most significant, the yield compared with the control group increased by 2.4% and 3.5%, respectively.

Keywords: nano carbon; winter wheat; soil moisture; soil nutrient; growth characteristics; yield

陕西关中地处暖温带半湿润易旱气候区,冬冷夏热,四季分明,年降雨量约 500 ~ 700 mm,地势平坦,灌溉条件较好,是陕西省优质小麦的优势生产区^[1]。然而近年来,随着人口的增长及社会经济的发展,各部门、各行业对土地资源的需求大幅增加,使得关中地区产生耕地面积连年锐减,耕地资源破坏和浪费严重,人地矛盾严峻^[2]。这些问题严重制约着陕西省粮食生产的发展和粮食储备的稳定,科学合理利用有限的耕地资源来提高单位面积粮食产量,已成为粮食生产发展的必由之路。

提高田间肥料施用量是近年来提高关中地区粮食单产的主要方式,但化肥的大量投入在增加粮食单产的同时,大量化肥流失到土壤环境中,引起土壤产生酸化板结、硝酸盐污染和土壤次生盐渍化,从而导致土壤肥力下降,并造成水体富营养化,淋溶污染地下水^[3-5]。近年来随着纳米技术的不断发展,国内外学者发现纳米材料作为一种具有特殊性质的新型材料,在植物营养与土壤领域具有很大的潜力,其中纳米碳材料具有巨大的比表面及小尺寸效应的特点,极易与土壤中营养元素和微量元素发生吸附或耦合成为高效复合肥料,且其遇水可提升土壤电动位,降低土壤 pH 值,提升土壤离子浓度,促进养分释放;学者提出利用纳米碳提高肥料利用效率,促进植物养分吸收^[6-8]。Lin 等^[9]研究发现纳米碳材料

不仅对水稻生长无污染,且能够被水稻吸收、转运并可以转移到下一代。李一丹^[10]在东北单季稻种植区研究不同施氮水平下纳米碳对水稻产量、肥料利用率的影响,结果表明纳米碳可提高水稻产量;在适宜施氮量条件下,加施纳米碳能够提高水稻氮肥利用率。刘世杰等^[11]研究了纳米碳对玉米苗期生长和养分吸收及淋失的影响,试验结果表明纳米碳能够促进玉米苗期的生长,减少养分淋失,增加玉米对氮、磷、钾的吸收。

因此本研究借鉴纳米材料科学研究的经验,通过大田试验,条施不同含量纳米碳,探讨其对小麦生长及土壤水分、养分含量的影响,以期对纳米碳应用于提高冬小麦水肥利用率及产量提供经验与技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地点为陕西省咸阳市杨陵区下川口村农用地,该地位于东经 $108^{\circ} \sim 105^{\circ}07'$,北纬 $34^{\circ}12' \sim 34^{\circ}20'$ 之间。地处暖温带,属于大陆性季风气候,海拔 523 m,一年四季冷热干湿分明,年平均气温 13°C ,年平均降水为 550 ~ 650 mm,且降水主要分布在 6—9 月。该地区主要的地貌特征是南部为河流冲积平原,北部是黄土台原,土壤类型为典型的塬土^[12-13]。试验小区内土壤理化性质见表 1。

表 1 土壤理化性质
Table 1 Soil physical and chemical properties

土壤 Soil	颗粒含量 Particle content/%			pH	有机质 Organic matter /($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全氮 Total nitrogen /($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全磷 Total phosphorus /($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全钾 Total potassium /($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
	粘粒 Clay < 0.002 mm	粉粒 Silt 0.002 ~ 0.02 mm	砂粒 Sand > 0.02 mm					
塬土 Lou soil	21.35	45.90	32.75	8.62	10.92	0.83	1.39	22.8

1.2 试验设计

在试验农用耕地布设 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$ 的试验小区,隔垄条施不同含量纳米碳(纳米碳购置于上海海诺炭业有限公司,质量含量分别为 0、0.001、0.005、0.007、 $0.010\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。纳米碳混合层深度为土壤表面以下 5 ~ 10 cm。在施加纳米碳之前,将垄间土壤表层 5 cm 土壤取出,将 5 ~ 10 cm 土壤与纳米碳分别按照质量含量 0、0.001、0.005、0.007、 $0.010\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 混合后回填,并将表土一并回填。为防止家禽畜及野外动物破坏小区,利用 1 m 高的铁丝网

在每块试验小区外围围成 $3\text{ m}\times 3\text{ m}$ 的防护区。每个处理两个重复,共计 10 个试验小区。

试验小麦品种为冬小麦小堰 22 号。大田试验所用冬小麦种子在播种前均做如下处理:10% H_2O_2 表面消毒 30 min,以防止生菌;清水洗净后,用饱和硫酸钙(CaSO_4)溶液浸泡 4 h,转移到用饱和硫酸钙溶液浸透的纱布上,以保持种子所需的水分条件;覆盖黑色塑料膜(提供适宜温度,并起到遮光的作用)在 25°C 下催芽一昼夜,待胚根露出后播种,播种深度为 1 cm。播种前在各小区均匀施入化肥,氮肥

(N)施用量为 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,磷肥(P_2O_5)施用量为 $108\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,钾肥(K_2O)施用量为 $108\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。冬小麦播种前进行灌水,使底墒充足;越冬期时对大田进行冬灌,起蓄水、增墒的作用,灌水量为 90 mm 左右;越冬期后对大田进行春灌,促进麦苗早返青,灌水量为 90 mm 左右。

试验监测期间,在冬小麦幼苗期、返青期、拔节期、抽穗期和灌浆期内,于各个小区内按照 S 形选取 5 个采样点,进行土壤样品采样,用于测定土壤含水量及土壤养分,并在每个小区随机选取 30 株小麦,所选小麦各器官保持完整。由于土壤深度 $0\sim 10\text{ cm}$ 内土壤水分养分含量变化较大,因此在 $0\sim 10\text{ cm}$ 深度范围内每 2 cm 取一份样本,土壤剖面 $10\sim 30\text{ cm}$ 内每 5 cm 取一份样本。土壤含水量样本装至标有序号的铝盒,土壤养分样本密封至标有序号的塑封袋内。同一小区同层土壤样本经测定后,取平均值进行后续分析。

1.3 分析项目与测定方法

(1) 土壤含水量及土壤养分:利用烘干法测土壤含水量;选取 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的乙酸铵溶液作为浸提

液,使用原子吸收分光光度计测土样中的速效钾;选取 $0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的氯化钙溶液作为浸提液,使用紫外-可见分光光度计测水土样中的硝态氮;选取 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的碳酸氢钠溶液作为浸提液,钼盐溶液与抗坏血酸混合液为显色剂,使用紫外-可见分光光度计测土样中的速效磷。

(2) 冬小麦生育指标:使用游标卡尺和直尺分别测小麦茎粗和株高,根据小麦叶片长宽与叶面积系数计算得小麦叶面积,将整株小麦装于标有序号的信封中,放入烘箱内。温度调整为 105°C 杀青 30 min ,之后调整温度为 85°C 烘干 12 h 。烘好的小麦测定其生物量。小麦成熟后按小区脱粒记产。

(3) 植株养分:样品经烘干粉碎后用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{--H}_2\text{O}_2$ 法消解,采用连续流动分析仪测定氮素和磷素含量,用火焰光度计测定钾素。

2 结果与分析

2.1 纳米碳对农田土壤剖面含水量的影响

从冬小麦整个生育期内不同土壤深度的土壤含水量分布来看(图 1),表层土壤由于蒸散量较大,含

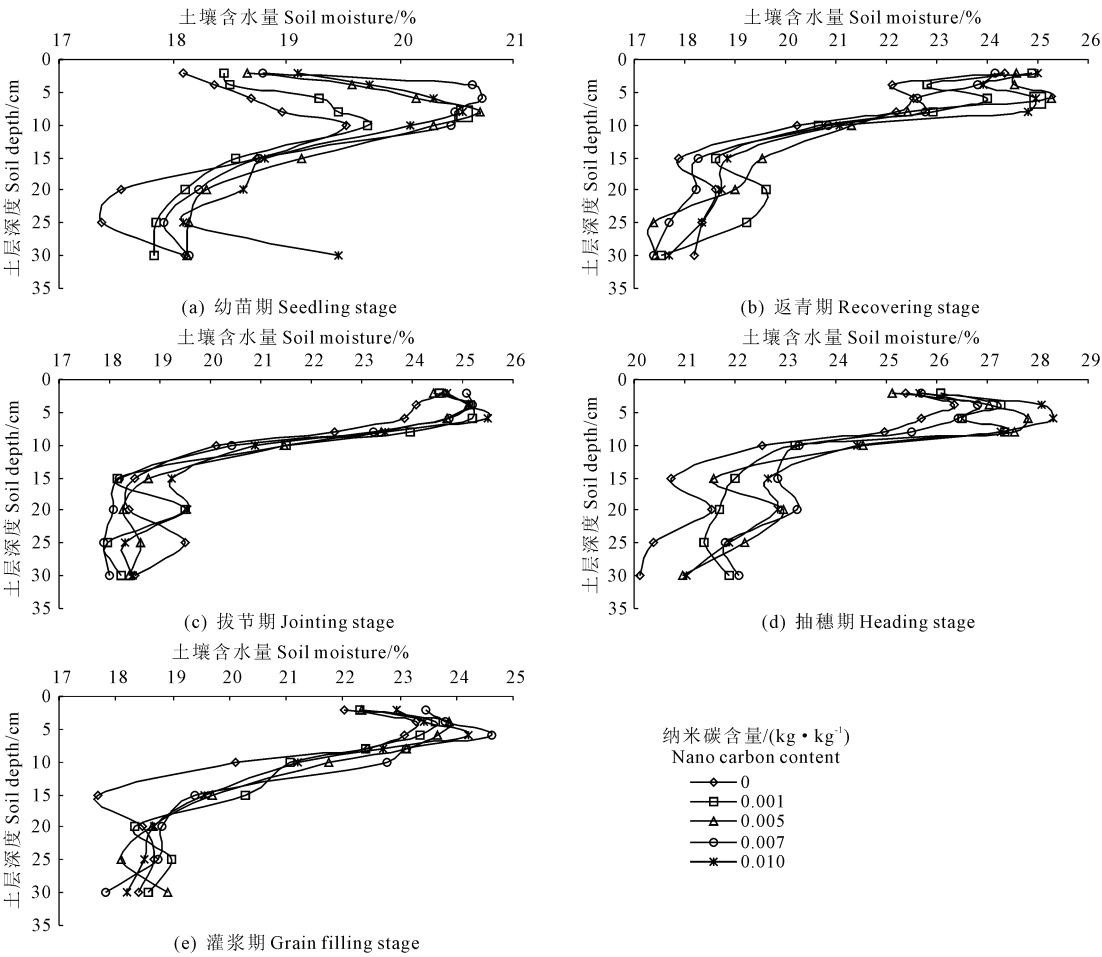


图 1 不同纳米碳含量对冬小麦农田土壤含水量的影响

Fig.1 The influence of nano carbon content on soil water content of winter wheat field

水量较低,随着土壤深度的增加,土壤含水量呈现出先增加而后减少的趋势,在 5 ~ 10 cm 土层土壤内达到最大值。进一步分析纳米碳对其影响可以看出,施加纳米碳的小区表层 10 cm,即纳米碳层以上部分土壤含水量要高于对照组,且土壤含水量较对照试验土壤深度 10 cm 以下迅速减小并在较小范围内波动,其中纳米碳质量含量为 0.007 kg·kg⁻¹和 0.010 kg·kg⁻¹处理的小区从冬小麦幼苗期到灌浆期,5 ~ 10 cm 土壤深度内土壤平均含水量与对照组相比分别增加了 4.5% 和 6.8%。且灌水对土壤含水量的影响主要体现在冬小麦返青期,灌水后,表层土壤水分在短时间内受蒸散作用较小,因此在一段时间内保持较大土壤含水量。杨静敬等^[14]针对杨凌区浅层土壤水分进行研究可得农田土壤含水量最大值出现在 20 ~ 40 cm 处,而本研究中各小区土壤剖面含水量受纳米碳影响较大,含水量较大值位于纳米碳条施深度 5 ~ 10 cm 这一土壤深度范围内,在图中表现为最大土壤水量深度上移的现象。林祥等^[16]对小麦出苗率与土壤含水量关系的研究发现,小麦出苗率主要受 0 ~ 10 cm 土壤含水量的影响。刘艳丽等^[15]通过不同纳米碳含量影响土壤水分运动的研

究发现,土壤添加纳米碳后,土壤中大孔隙数量降低,中小孔隙数量增加,而与大孔隙相比,小孔隙中的水分受外界吸力影响较小,保持水分能力较强;且纳米碳具有极大比表面积,表面能极高,对水分有较高的吸持力。因此纳米碳施加对提高农田土壤持水性以及提高小麦出苗率有重要意义。

2.2 纳米碳对土壤养分含量的影响

2.2.1 纳米碳对土壤硝态氮的影响 硝态氮是土壤氮素的主要形态之一,也是土壤速效氮的重要组成部分,在土壤养分方面常作为氮素供应指标之一。硝态氮也反映了土壤氮素的转化水平、土壤通气条件等。

由图 2 可以看出,由于冬小麦在幼苗期株体小、气温低、光合能力较弱,对氮素的吸收累积速率小,因此土壤中硝态氮差值较小,含量较大;拔节期开始以后,由于气温升高、植株生长加快、光合能力不断增强,小麦对土壤中氮素的吸收累积速率迅速提高,因此土壤中硝态氮差值变大,含量迅速减小。抽穗期到灌浆期小麦主要器官生长发育趋近完全,干物质累积速率大幅度减缓,因此在这两个生育期内土壤硝态氮差值变化较小。进一步分析图 2 可以看出,

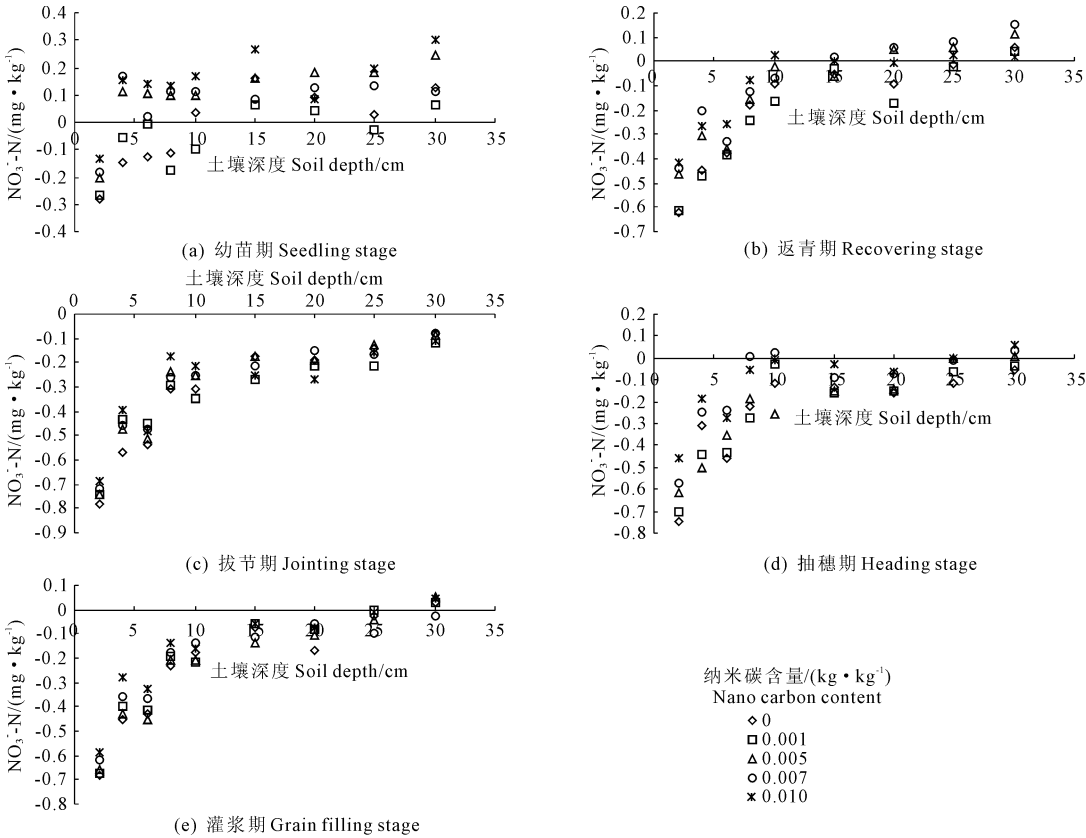


图 2 不同纳米碳含量处理下冬小麦播种前后农田土壤硝态氮差值分析

Fig.2 Analysis on difference value of nitrate nitrogen in soil before and after sowing of winter wheat under different nano carbon content

施加纳米碳的小区表层土壤硝态氮差值明显小于对照小区,且随冬小麦生育期推移,土壤剖面硝态氮差值随着纳米碳含量的增大而减小。其中纳米碳质量含量为 $0.007\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.010\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理的小区灌浆期 $5\sim 10\text{ cm}$ 土层土壤内平均硝态氮含量与对照组相比分别增加了 25% 和 33.6%。

由于硝态氮不易被土壤颗粒吸附,主要以溶质的形式存在于土壤溶液中^[17],极易被淋溶。因此,将纳米碳条施于土壤表层以下 $5\sim 10\text{ cm}$,提升了这一土壤深度范围内的土壤水分吸持能力,同时抑制了硝态氮的向下淋移,有效提升了氮肥的利用率。

2.2.2 纳米碳对土壤速效钾的影响 由图 3 可以看出,同硝态氮变化规律相似,小麦生育初期,由于温度较低,小麦生长缓慢,作物吸钾强度较小,土壤

速效钾比较稳定,主要聚集在土壤表层,并随土层加深而减少。由图可以看出,土层深度 $0\sim 10\text{ cm}$ 内,施加纳米碳的小区土壤速效钾高于对照组,其中纳米碳质量含量为 $0.007\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.010\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理的小区在灌浆期 $5\sim 10\text{ cm}$ 土壤深度内平均速效钾含量与对照组相比分别增加了 6.6% 和 17.5%。返青期过后小麦生长旺盛,吸钾强度迅速增大,从图 3(c)看出土壤速效钾急剧减小,之后抽穗期和灌浆期小麦对钾的需求量渐趋减少,吸钾强度下降。

土壤中的速效钾吸附性较差,移动性很强,在土壤中主要发生物理化学吸附,吸附位点主要在粘粒上^[18],而纳米碳是一种吸附性较强的新型材料,在粘粒含量较低的土壤中,其可以增加钾离子在条施纳米碳土层内的滞留时间,从而抑制高移动性的钾离子向深层土壤迁移,提高钾肥的利用率。

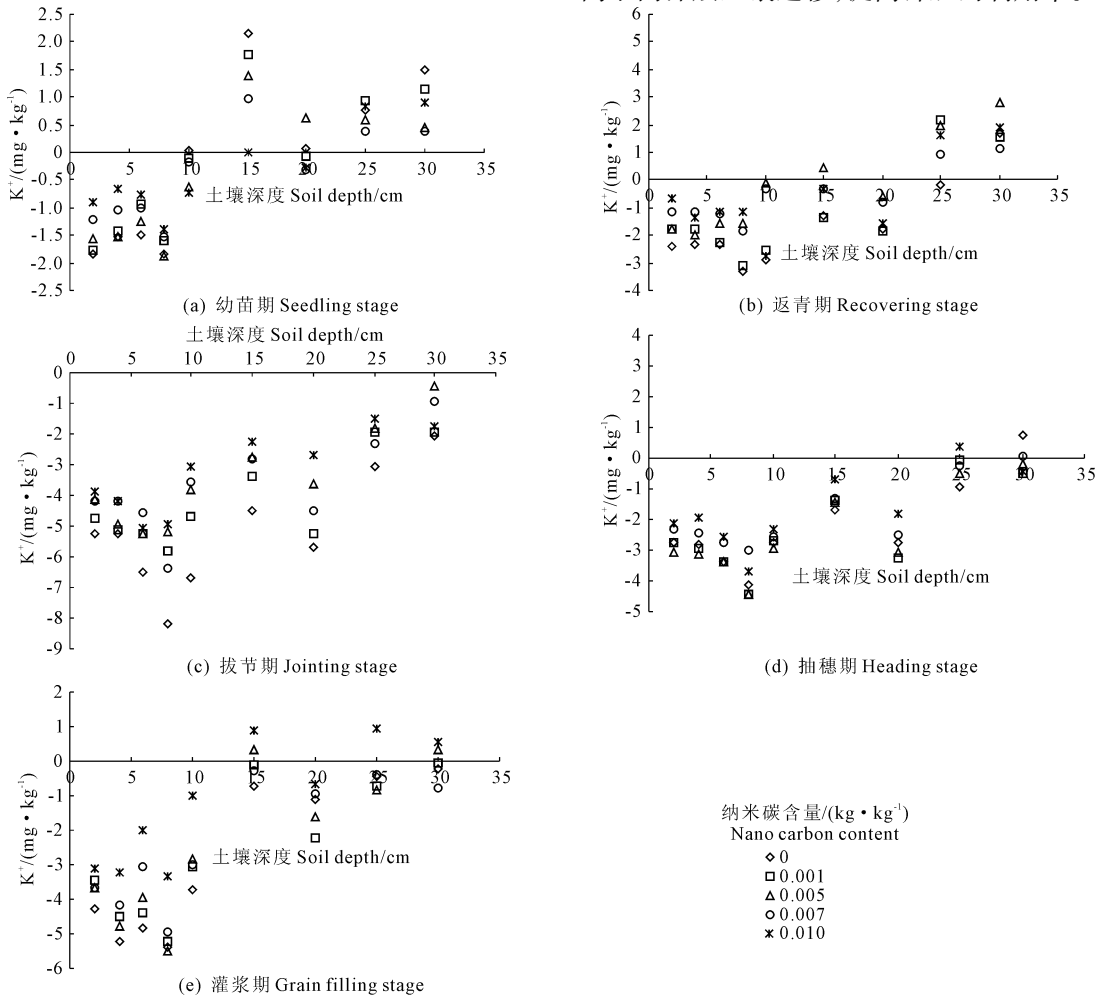


图 3 不同纳米碳含量处理下冬小麦播种前后农田土壤速效钾差值分析
Fig.3 Analysis on difference value of available potassium in soil before and after sowing of winter wheat under different nano carbon content

2.2.3 纳米碳对土壤速效磷的影响 磷素作为作物生长发育的必需营养元素,是作物体内脂肪、糖、

含氮化合物和酶生成的重要组成元素,对于增强植株抗寒、抗旱性有重要作用。

图 4 反映了不同纳米碳含量处理的试验小区在冬小麦各生育期内对土壤速效磷含量的影响。从图 4 中土壤钾的差值可以看到,各小区土壤中速效磷浓度与初始含量相比,差值较小且各生育期内差值均较为稳定。其中在 0~10 cm 土层深度,经过条施纳米碳处理的小区,速效磷的差值要小于对照组,且差值变化随着纳米碳质量含量的增加而减小,其中纳米碳质量含量为 0.007 kg·kg⁻¹和 0.010 kg·kg⁻¹处理的小区在灌浆期 5~10 cm 土壤深度内平均速效磷含量与对照组相比分别增加了 43.7% 和 51.3%。由图 4(c)可知,小麦拔节期时,植株生长量大,对磷需求量大,因此速效磷差值较其他生育期较大。

土壤对速效磷有较强的吸附作用,与硝态氮、速效钾相比,磷素在土壤中具有固定性强、移动性弱的显著特点。徐海等^[19]研究表明,随着小麦生长发育进程土壤速效磷的耗竭空间有明显的从表层向深层土壤逐渐延伸的趋势,且在小麦生长初期,土壤速效磷的消耗空间主要在 0~20 cm 土层范围以内。而在本研究中,纳米碳质量含量为 0.007 kg·kg⁻¹和 0.010 kg·kg⁻¹处理的小区在冬小麦幼苗期和返青期,土壤速效磷在 0~10 cm 土壤深度范围内均出现了不同程度的增加,这说明纳米碳施到试验田中,在吸附土壤中速效磷的同时,还胶结了大量附着磷素的土壤细颗粒,进一步稳固了磷素在相应土层深度的留存。

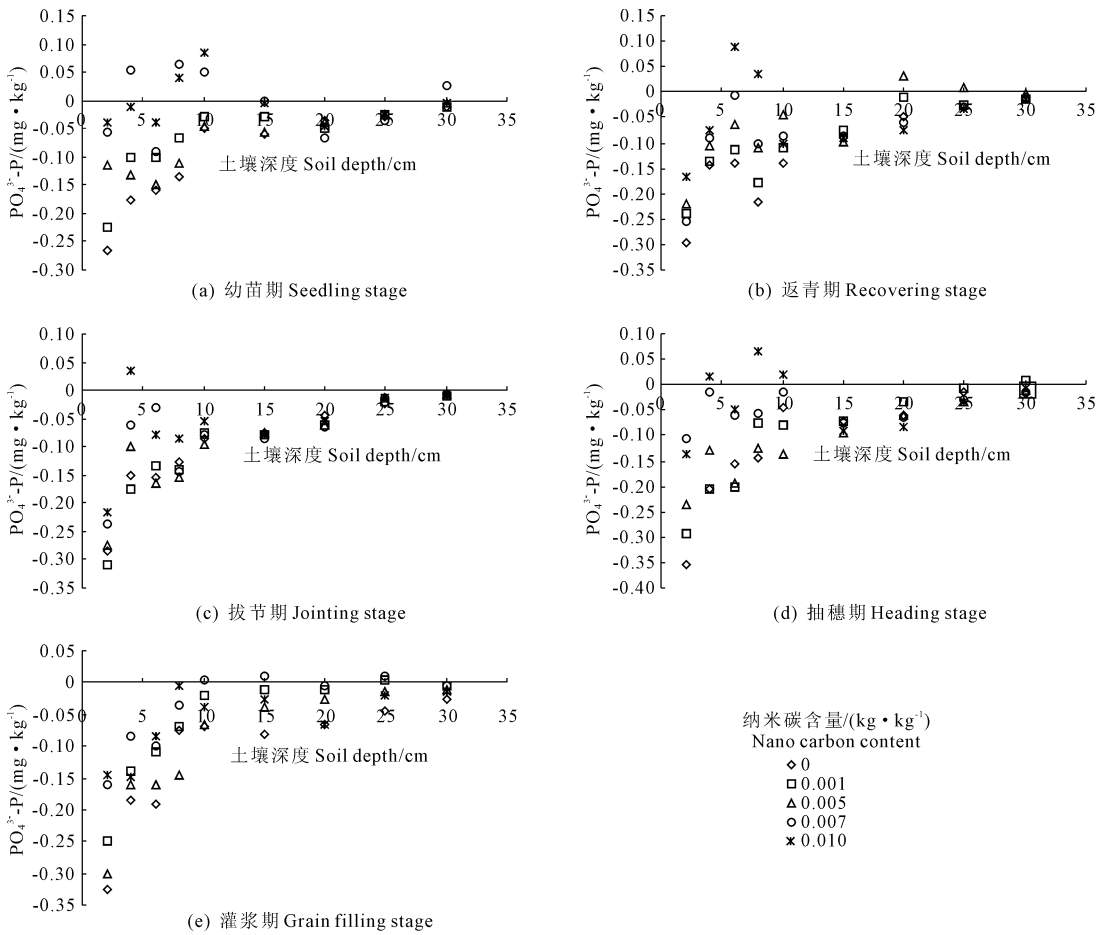


图 4 不同纳米碳含量处理下冬小麦播种前后农田土壤速效磷差值分析

Fig.4 Analysis on difference value of available phosphorus in soil before and after sowing of winter wheat under different nano carbon content

2.3 纳米碳对冬小麦生长发育的影响

2.3.1 纳米碳对冬小麦植株养分的影响 对表 2 内数据进行分析可以看出,随冬小麦生育期的延长,由于植株干物质的累积速率大于养分吸收速率,作

物体养分含量呈降低趋势。冬小麦在生育初期,植株内硝态氮阶段累积量缓慢增加,在返青期后迅速增大,拔节期时达到最大,之后硝态氮阶段累积量逐渐降低。土壤中加入纳米碳后,增强了土壤胶体

对氮的吸附能力,抑制了氮素随土壤水下移,从而增加了氮素在冬小麦根系活动区域的存留时间。进一步分析数据可知,冬小麦在拔节期对养分需求量最大,施加纳米碳的小区根系速效氮含量较大,同时提升了根部供给茎、叶的氮素含量。

而冬小麦植株对磷素的吸收与氮素有很大区别。由于磷肥施入土壤后,大部分累积在土壤剖面中,小麦植株对这一部分磷素吸收能力较弱,因此冬小麦植株在各生育期的速效磷阶段累积量较小。而在纳米碳含量较高的小区内,冬小麦植株在各生育期的磷素含量也相对较大,表明纳米碳在土壤中可以提高小麦根部对磷的吸收能力。

小麦作为禾本科作物,对钾的吸收能力很强,从表 2 中可以看到,冬小麦各生育期内,植株速效钾的阶段累积量要大于氮和磷。冬小麦对土壤中钾的吸收,决定于土壤溶液中钾的浓度和土壤维持这一浓度的能力。而施加纳米碳的土壤对钾的吸附作用,可

以减缓钾在土壤中的纵向迁移,显著增加钾在相应土层的滞留时间,保证了根系对钾的吸收时长,同时也为冬小麦提供了较高的土壤钾浓度的吸收环境。

2.3.2 纳米碳处理对冬小麦生长性状的影响 由表 3 可知,纳米碳含量较高的小区(0.007 kg·kg⁻¹和 0.010 kg·kg⁻¹)与对照组相比较,冬小麦茎粗、叶面积及生物量有所增大,但株高差异规律不明显。说明较高质量含量的纳米碳处理有助于冬小麦增加茎粗,提高水分养分向上运输的效率;同时有助于冬小麦增大叶面积,提高光合作用,从而增加小麦的生物量。

表 4 反映了不同纳米碳含量对冬小麦产量的影响,可以看出,纳米碳含量较高处理的小区(0.007 kg·kg⁻¹和 0.010 kg·kg⁻¹)对冬小麦穗粒数、千粒重及产量有着显著地促进作用。0.007 kg·kg⁻¹和 0.010 kg·kg⁻¹纳米碳处理的小区与对照组相比产量分别增加了 2.4%和 3.5%。

表 2 纳米碳对冬小麦植株养分含量的影响/(g·kg⁻¹)
Table 2 The influence of nano carbon on the nutrient content of winter wheat

生育期 Growth period	纳米碳含量 Nano carbon content /(kg·kg ⁻¹)	叶片 Leaves			茎干 Stem			根部 Root		
		NO ₃ ⁻ -N	PO ₄ ³⁻ -P	K ⁺	NO ₃ ⁻ -N	PO ₄ ³⁻ -P	K ⁺	NO ₃ ⁻ -N	PO ₄ ³⁻ -P	K ⁺
返青期 Recovering stage	0	26.30d	1.87d	27.43e	30.87c	2.12d	32.80d	21.57c	1.57c	33.53e
	0.001	27.07c	2.23b	31.37d	31.13b	2.73a	37.43c	22.93a	1.67b	41.70c
	0.005	27.27b	2.03c	43.10a	30.93c	2.55c	38.53c	22.73b	1.87a	34.66d
	0.007	27.17b	2.30a	36.06c	30.5d	2.61b	41.57b	22.50ab	1.96a	42.50b
	0.010	27.80a	2.27a	36.93b	31.4a	2.66b	45.40a	23.10a	1.77b	43.86a
拔节期 Jointing stage	0	20.13d	1.57d	21.5d	23.83a	2.01b	25.86b	19.27c	1.40c	25.70b
	0.001	20.37c	1.80b	24.27b	22.93b	2.03b	21.36d	18.73d	1.47b	27.61a
	0.005	20.30b	1.73c	24.40b	23.10b	2.11a	22.50c	19.43ab	1.50b	22.53d
	0.007	20.50b	1.80ab	22.13c	22.97b	2.13a	25.61b	19.63a	1.37d	24.70c
	0.010	20.73a	1.90a	25.27a	22.80c	1.97c	27.07a	19.57a	1.56a	27.56a
抽穗期 Heading stage	0	17.37b	1.33c	17.03e	19.60b	1.70b	20.27b	16.70a	1.36c	21.03b
	0.001	17.47a	1.60a	17.93d	18.97d	1.67c	18.80d	16.86c	1.47a	20.93c
	0.005	16.83c	1.50b	20.23c	19.27c	1.73b	19.26c	16.60b	1.40b	20.60d
	0.007	17.57a	1.57b	20.80b	19.13c	1.70b	19.10c	16.67bc	1.30c	21.51a
	0.010	17.47a	1.63a	21.30a	20.03a	1.81a	21.27a	16.53b	1.44a	21.73a
灌浆期 Grain filling stage	0	9.50c	1.27b	11.05d	10.5c	1.40a	13.60ab	8.80a	1.13a	13.30c
	0.001	9.60b	1.26ab	11.60c	10.8a	1.27c	11.87c	8.60bc	1.06b	13.44c
	0.005	9.63b	1.23b	13.36a	10.67b	1.33b	12.93b	8.47c	1.10b	13.43c
	0.007	9.47cd	1.16c	11.87b	10.60b	1.33b	13.61a	8.36d	1.07b	13.73b
	0.010	10.03a	1.30a	13.27a	10.73ab	1.37b	13.70a	8.63b	1.13a	14.17a

注:同列数值后不同字母表示差异显著($P < 0.05$),下同。
Note: different letters in same column indicate significant difference at $P < 0.05$ levels; the same below.

表 3 纳米碳处理对冬小麦生长性状的影响

Table 3 The influence of nano carbon on growth characters of winter wheat

纳米碳处理 /(kg·kg ⁻¹) Treatments	生长性状 Growth characters	生育期 Growth period				
		幼苗期 Seedling stage	返青期 Recovery stage	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	灌浆期 Grain filling
0	株高 Plant height/cm	16.500 ± 1.300	31.940 ± 2.800	63.100 ± 3.200	70.900 ± 4.200	61.580 ± 3.100
	茎粗 Stem diameter/mm	1.386 ± 0.191	1.664 ± 0.257	1.606 ± 0.065	3.282 ± 0.101	4.047 ± 0.217
	叶面积 Leaf area/(cm ² ·株 ⁻¹)	22.830 ± 1.410	36.250 ± 1.580	88.540 ± 2.360	72.040 ± 2.030	56.830 ± 1.250
	生物量 Biomass/(g·株 ⁻¹)	0.266 ± 0.041	0.482 ± 0.052	0.896 ± 0.067	1.540 ± 0.133	2.200 ± 0.223
0.001	株高 Plant height/cm	16.700 ± 2.100	29.200 ± 2.200	59.200 ± 4.800	71.000 ± 2.300	67.400 ± 2.500
	茎粗 Stem diameter/mm	1.301 ± 0.254	1.563 ± 0.225	1.697 ± 0.113	3.045 ± 0.083	4.278 ± 0.226
	叶面积 Leaf area/(cm ² ·株 ⁻¹)	24.750 ± 1.030	33.480 ± 1.060	85.830 ± 2.740	69.320 ± 1.550	60.040 ± 3.130
	生物量 Biomass/(g·株 ⁻¹)	0.204 ± 0.023	0.455 ± 0.031	0.751 ± 0.051	1.880 ± 0.142	2.370 ± 0.216
0.005	株高 Plant height/cm	15.600 ± 1.400	29.400 ± 3.300	58.500 ± 1.500	69.400 ± 2.600	71.000 ± 1.900
	茎粗 Stem diameter/mm	1.191 ± 0.152	1.555 ± 0.206	1.641 ± 0.236	3.464 ± 0.218	4.426 ± 0.134
	叶面积 Leaf area/(cm ² ·株 ⁻¹)	28.660 ± 1.580	35.100 ± 1.770	94.080 ± 2.520	73.880 ± 1.360	55.480 ± 2.160
	生物量 Biomass/(g·株 ⁻¹)	0.193 ± 0.016	0.413 ± 0.048	0.861 ± 0.073	1.960 ± 0.114	2.08 ± 0.274
0.007	株高 Plant height/cm	16.800 ± 1.600	28.000 ± 2.800	61.000 ± 2.100	75.300 ± 1.800	66.800 ± 1.500
	茎粗 Stem diameter/mm	1.255 ± 0.205	1.522 ± 0.176	1.670 ± 0.129	3.377 ± 0.193	4.684 ± 0.208
	叶面积 Leaf area/(cm ² ·株 ⁻¹)	29.130 ± 1.060	37.210 ± 2.140	91.650 ± 0.910	72.040 ± 2.420	63.260 ± 1.770
	生物量 Biomass/(g·株 ⁻¹)	0.201 ± 0.033	0.501 ± 0.025	0.904 ± 0.032	1.790 ± 0.208	2.460 ± 0.316
0.010	株高 Plant height/cm	16.900 ± 2.000	29.200 ± 1.700	66.200 ± 2.400	73.500 ± 2.200	69.400 ± 2.700
	茎粗 Stem diameter/mm	1.318 ± 0.173	1.528 ± 0.227	1.675 ± 0.260	3.883 ± 0.144	4.530 ± 0.176
	叶面积 Leaf area/(cm ² ·株 ⁻¹)	29.770 ± 1.210	38.030 ± 0.830	101.200 ± 2.280	75.460 ± 3.380	66.700 ± 1.510
	生物量 Biomass/(g·株 ⁻¹)	0.213 ± 0.019	0.494 ± 0.044	1.050 ± 0.028	2.140 ± 0.153	2.530 ± 0.197

表 4 纳米碳对冬小麦产量性状及产量的影响

Table 4 The influence of nano carbon on winter wheat yield traits and yield

纳米碳处理 /(kg·kg ⁻¹) Treatments	穗粒数 Grain number per spike	千粒重 Thousand seed weight/g	产量 Yield /(kg·hm ⁻²)
0	45.47d	42.80c	7833.3d
0.001	44.03e	40.75d	7751.7e
0.005	46.22c	43.45b	7916.6c
0.007	48.27b	44.55a	8018.8b
0.010	48.93a	44.20a	8105.6a

3 结论与讨论

1) 农田土壤表层以下 5 ~ 10 cm 施加纳米碳后, 纳米碳填充了土壤中的孔隙, 改变了原有的水分流动通道, 孔隙弯曲度增加, 从而延缓了水分向深层土壤入渗的速率。因此条施纳米碳的小区在冬小麦各生育期内根系层土壤水分含量增加, 深层土壤含水量降低, 且土壤水分分布波动减小。说明农田条施纳米碳可以促进作物根系吸水, 增加土壤保持水分

的能力。

2) 具有极大比表面积和强吸附性的纳米碳可以在土壤中延缓氮的淋溶, 吸附土壤中高移动性的钾离子, 以及胶结吸附着大量磷素的土壤细颗粒, 因此冬小麦农田施加纳米碳可控制养分深层淋溶, 有效保持土壤表层剖面养分含量, 增加作物生长所必需的氮、磷、钾在作物根系层的滞留时间, 使得作物根系能够更为充分吸收利用土壤养分。且纳米碳含量较大时, 其土壤对养分的吸持能力更为显著, 进一步提高了冬小麦在各生育期内的养分利用率。

3) 在光照、温度、空气、土壤类型相同的条件下, 对作物干生物量的累积及各生育期内作物各项生育指标产生影响最大的就是水分和养分, 而纳米碳在土壤中对水分及氮、磷、钾等养分具有显著的保持作用, 对照本文试验结果, 较大质量含量的纳米碳处理在冬小麦生育期内可促进冬小麦的茎叶发育, 增大冬小麦的茎粗和叶面积, 并提高小麦植株的生物量。且质量含量为 0.007 kg·kg⁻¹ 和 0.010 kg·kg⁻¹ 的纳米碳处理小区, 冬小麦产量与对照组相比分别增加了 2.4% 和 3.5%。

综上所述,冬小麦农田中条施纳米碳可以提高土壤含水率,保持土壤肥力,特别是在降水量较少且时空不均匀,土壤养分流失较为严重的陕西关中地区,通过纳米碳改善土壤的理化性质,提高小麦对水肥的利用效率,促进其茎叶发育,从而增加小麦植株生物量和最终产量。土壤中添加不同的改良剂对土壤理化性质变化及作物生长过程和产量有着不同的效果。一些国内学者通过在土壤中添加 PAM 和生物炭实现增加土壤养分、水分及作物产量的目的^[20-21],与纳米碳相比,PAM 属于纯化学大分子物质,未能全面考虑土壤有机质及有机碳的积累,目前仍处于试验研究阶段,未能进行大面积实施^[22];同时生物炭由于颗粒较大,其调控效果依靠极大的施用量,较难用于实际应用,且极易随降雨径流进入河流,人为造成水域污染^[23-24]。因此,纳米碳作为环境友好型的土壤改良剂,还有很大的研究利用空间。

参 考 文 献:

[1] 王彬龙,魏艳丽,张 平.陕西关中小麦生产中存在的问题及对策[C]//中国作物学会.2010 中国作物学会学术年会论文摘要集,北京:中国作物学会,2010:86-87.

[2] 邢清枝.关中地区土地资源生态安全动态变化特征分析[D].西安:陕西师范大学,2010.

[3] 张维理,武淑霞,冀宏杰,等.中国农业面源污染形势估计及控制对策 I .21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J].中国农业科学,2004,37(7):1009-1009.

[4] 黄国勤,王兴祥,钱海燕,等.施用化肥对农业生态环境的负面影响及对策[J].生态环境,2004,13(4):656-660.

[5] 高祥照,马文奇,杜 森,等.我国施肥中存在问题的分析[J].土壤通报,2001,32(6):258-261.

[6] 张志明,刘 键,韩 振,等.纳米增效肥对杂交稻的增产效果研究[J].腐植酸,2012,(2):15-19.

[7] 肖 强,孙焱鑫,王甲辰,等.纳米材料在土壤与植物营养领域的应用进展[J].中国土壤与肥料,2009,4(4):10-15.

[8] Li X, Shen Q, Zhang D, et al. Functional groups determine biochar

properties (pH and EC) as studied by two-dimensional ¹³ C NMR correlation spectroscopy[J]. Plos One, 2013,8(6):e65949.

[9] Lin D, Xing B. Phytotoxicity of nanoparticles: Inhibition of seed germination and root growth[J]. Environmental Pollution, 2007,150(2):243-250.

[10] 李一丹.纳米碳对水稻产量及氮肥利用率的影响[J].中国稻米,2013,19(1):44-46.

[11] 刘世杰,窦 森.黑碳对玉米生长和土壤养分吸收与淋失的影响[J].水土保持学报,2009,23(1):79-82.

[12] 史银光,李 花,李平儒,等.长期施用化肥或不同有机物对土娄土土壤物理性质的影响[J].西北农业学报,2010,19(9):124-130.

[13] 古巧珍,杨学云,孙本华,等.长期定位施肥对土娄土耕层土壤养分和土地生产力的影响[J].西北农业学报,2004,13(3):121-125.

[14] 杨静敬,蔡焕杰,王松鹤,等.杨凌区浅层土壤水分与深层土壤水分的关系研究[J].干旱地区农业研究,2010,28(3):53-57.

[15] 刘艳丽,周蓓蓓,王全九,等.纳米碳对黄绵土水分运动及溶质迁移特征的影响[J].水土保持学报,2015,29(1):21-25.

[16] 林 祥,王 东,谷淑波.播种期补灌对土壤含水量和小麦籽粒产量的影响[J].麦类作物学报,2015,35(12):1700-1711.

[17] 陈效民.土壤环境中硝态氮运移的特点、模型描述及其在太湖地区乌栅土上的应用研究[D].南京:南京农业大学,2000.

[18] 熊明彪,雷孝章,田应兵,等.钾离子在土壤中吸附和解吸动力学研究进展[J].生态环境,2003,12(1):115-118.

[19] 徐 海,王益权,刘 军,等.关中旱地小麦生育期土壤速效养分时空变异特征研究[J].干旱地区农业研究,2009,27(1):62-67.

[20] 任志宏,于 健,史吉刚,等.PAM 与 SAP 对土壤水分及小麦生长的影响[J].节水灌溉,2015,(4):6-9.

[21] 陈心想,何绪生,耿增超,等.生物炭对不同土壤化学性质、小麦和糜子产量的影响[J].生态学报,2013,33(20):6534-6542.

[22] 员学锋.PAM 的土壤保水、保肥及作物增产效应研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2003.

[23] 何绪生,张树清,余 雕,等.生物炭对土壤肥料的作用及未来研究[J].中国农学通报,2011,27(15):16-25.

[24] 高 雪.生物炭土壤环境效应研究进展[J].城市建设理论研究,2014,32(15):770-780.