

陈思悒,李升峰,朱继业. 种植密度对小麦根际土壤特性及籽粒产量的影响[J]. 江苏农业科学,2016,44(4):132-137.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.04.034

种植密度对小麦根际土壤特性及籽粒产量的影响

陈思悒,李升峰,朱继业

(南京大学地理与海洋科学学院,江苏南京 210093)

摘要:在大田条件下,以大穗型小麦品种泰农 18 为试验材料,分别设置不同种植密度 A1 (100 株/m²)、A2 (150 株/m²)、A3 (200 株/m²)、A4 (300 株/m²),研究不同种植密度对小麦根际土壤特性及籽粒产量的影响。结果表明:不同种植密度下,小麦根际土壤含水量、pH 值、全盐和电导率均随着生育进程呈逐渐降低趋势,而土壤总孔隙度随着生育进程呈增大趋势;土壤有机碳、全氮、全钾、有效氮和有效磷含量均随着生育进程呈逐渐增加趋势,而土壤全磷没有明显的变化趋势,表明增加种植密度对土壤养分、酶活性及微生物数量表现为一定程度的增加效应,对全磷没有明显影响。不同种植密度下,小麦籽粒产量随着密度的增加呈先增加后降低趋势,当种植密度达到 A3 时,小麦籽粒产量最高,种植密度超过 A3 时,小麦籽粒产量急剧降低。由此可知,A3 处理为小麦的最佳种植密度,这可能是由于小麦在低密度处理下植株量及根量较小,导致根系分泌物减少;过高种植密度下,由于营养竞争加剧,小麦有效光合能力下降,影响光合产物。A3 处理下,小麦群体处于合理的状态下,根系总量较多,地上部生长状况也较良好,因此小麦籽粒产量最高。

关键词:小麦;种植密度;土壤特性;产量;生理特性

中图分类号: S512.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)04-0132-05

小麦因其良好的丰产性、抗逆性、高品质、类型多、用途广而深受农民和科研工作者的喜爱^[1-2]。合理的种植密度是小麦高产的重要条件,在资源日益短缺、生产成本渐高的形势下,种植密度对小麦群体结构和产量的形成有显著调控效应,研究种植密度对小麦产量的影响,对于实现小麦的高效、高产、稳产具有重要意义^[1-3]。合理运用栽培管理措施,协同提高籽粒产量、养分利用效率是实现小麦高产高效的途径之一^[4]。研究表明,种植密度不仅影响小麦根系生长发育和群体数量与质量,而且还影响小麦对土壤养分的吸收、同化与分配,最终影响其产量^[5]。丛新军等研究表明,小麦基本苗应不少于 120 万株/hm²,过高则会影响花后干物质积累而导致减产^[6]。Lloveras 等指出,小麦适宜的种植密度范围为 150~500 株/m²^[7]。屈会娟等发现,基本苗为 150 株/m² 处理下,小麦成熟期单茎干物质积累量最高^[8]。土壤养分既是土壤有机物转化的执行者,又是植物营养元素的活性库,小麦根际土壤养分含量直接关系到有机质的分解和矿质元素的转化,与小麦的根系生长发育关系密切。近年来,许多学者对小麦土壤微生物与酶活性进行了相关研究。目前,关于以种植密度为调控手段对根际土壤养分及产量影响的研究还鲜见报道。本试验在大田条件下,连续 3 年研究了不同种植密度对小麦根际土壤养分、微生物数量及酶活性的影响,以期通过土壤养分、微生物数量、土壤酶活性变化,结合植株生长发育状况,为制定高产高效栽培管理措施提供理论依据。

收稿日期:2015-11-06

基金项目:国家社会科学基金重大项目(编号:10ZD&M030);江苏省高校人文社会科学重点项目(编号:2013ZDAM008)

作者简介:陈思悒(1990—),女,江苏南通人,硕士研究生,主要研究方向为植被生态、生态地理。E-mail:Chen_siyi90@126.com。

通信作者:李升峰,副教授,硕士生导师,主要研究方向为生态与环境科学。E-mail:lif@nju.edu.cn。

1 材料与方法

1.1 材料

供试小麦品种为泰农 18,由江苏丘陵地区南京农业科学研究所提供,千粒质量(53.4 ± 1.5) g。研究区位于南京大学小麦种植试验田(100 m × 100 m),种子安全贮存半年,确保种子度过休眠期,除去表面附着物,挑选籽粒饱满、无病虫害和机械损伤、大小均匀、色泽一致的种子,用 5% H₂O₂ 消毒 15 min,蒸馏水反复冲洗后常温下放置 12 h 备用。该区多年平均气温为 15.6 °C,多年平均降水量为 1 100 mm,土壤质地为壤质黏土,耕层土壤黏粒含量为 26.1%,土壤 pH 值 6.3,有机碳、全氮含量分别为 19.4、1.45 g/kg。

1.2 方法

试验于 2012—2014 年进行,结合整地施 P₂O₅ 150 kg/hm²、K₂O 150 kg/hm²,以上肥料作基肥一次掩底施入,总施 N 量 270 kg/hm²,基施 50%,其余 50% 于拔节期结合浇水施入。试验采用随机区组设计,种植密度设 4 个水平,3 次重复,共 12 个小区,小区面积 10 m × 10 m,小区之间留 2 m 宽保护行,为防止试验过程中践踏破坏植被,在各样方之间和样方内部都设置了木质或砖石质栈道。基本苗分别为 A1 (100 株/m²)、A2 (150 株/m²)、A3 (200 株/m²)、A4 (300 株/m²),于每年 10 月中旬播种,3 叶期定苗,田间管理按一般高产麦田进行,第 2 年 6 月收获,其他管理措施同一般高产田。

1.3 样品测定

根际土采用抖落法采集:在小麦各生育期挖取每株具有完整根系的土体(根系主要分布的范围),先轻轻抖落大块不含根系的土壤,小刀刮下附在根系周围的土壤(非根际土),然后用刷子刷下黏附在根围的土壤(距离根围 0~5 mm)作为根际土,尽量避免损害植物根系,彻底去除混杂于根际土中

的根系。混合采集的小麦根际土,将新鲜土样分为3份,第1份迅速置于聚乙烯塑料袋中以测定土壤含水量;第2份带回实验室风干后过1 mm筛,用于土壤酶活性及理化性质的测定;第3份于4℃冰箱中保存,用于土壤微生物数量的测定。并在同一区域用环刀测定土壤密度并计算土壤总孔隙度^[9]。

采用3,5-二硝基水杨酸比色法测定小麦根际土壤蔗糖酶活性;采用苯酚钠比色法测定小麦根际土壤脲酶活性;采用磷酸苯二钠法测定小麦根际土壤磷酸酶活性;采用高锰酸钾滴定法测定小麦根际土壤过氧化氢酶活性^[10]。采用平板梯度稀释法测定土壤微生物数量,其中细菌培养基为牛肉膏蛋白胨琼脂培养基,真菌培养基为马丁氏培养基,放线菌培养基为高氏一号琼脂培养基。成熟期收获,采用小区计产方法测产,每个小区收获5 m²,重复3次,脱粒晒干后测定产量并进行室内考种。小麦成熟期将叶片烘干粉碎,利用CCM-200叶绿素仪,用混合液浸提法测定叶绿素含量;用考马斯亮蓝-G 250染色法测定可溶性蛋白;用蒽酮比色法测定可溶性糖含量^[11]。

1.4 数据分析

所有数据均为3年数据的平均值。采用Excel 2007、SPSS 21.0软件统计分析数据;采用LSD多重比较法检验各处理间差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同种植密度对小麦根际土壤理化性质的影响

由表1可知,不同种植密度处理下小麦根际土壤含水量平均范围在8.91%~11.18%之间,土壤pH值平均范围在6.34~7.52之间,全盐平均范围在1.19~1.42 g/kg之间,电导率平均范围在71.18~79.03 μS/cm之间,总孔隙度平均范围在43.00%~43.38%之间。整个生长季小麦根际土壤含水量、全盐含量、电导率平均含量均随种植密度的增加呈先增加后降低趋势,A3处理下,小麦各指标达到最大,随后急剧降低。pH值随小麦种植密度的增加呈先降低后增加趋势,土壤总孔隙度呈不断波动趋势。A3处理下土壤含水量显著高于其他处理,A2与A4处理下土壤含水量差异并不显著。A4处理下土壤pH值显著高于其他处理,A1与A2处理下土壤pH值差异不显著,A3处理下土壤pH值显著低于其他处理。A3处理下土壤全盐含量显著高于其他处理,A1与A4处理下土壤含盐量差异并不显著。A3处理下土壤电导率显著高于其他处理,A1与A2差异并不显著,但显著高于A4处理。各种种植密度下小麦整个生长季土壤总孔隙度差异均不显著。

表1 不同种植密度下小麦根际土壤理化性质

处理	生育期	含水量 (%)	pH 值	全盐含量 (g/kg)	电导率 (μS/cm)	总孔隙度 (%)
A1	返青期	10.47 ± 2.13	7.68 ± 0.56	1.29 ± 0.15	79.62 ± 5.23	42.21 ± 1.05
	拔节期	9.58 ± 1.56	7.35 ± 0.89	1.31 ± 0.23	81.31 ± 6.15	42.68 ± 1.36
	抽穗期	7.24 ± 1.38	6.58 ± 0.73	1.24 ± 0.17	75.23 ± 3.48	43.42 ± 1.84
	成熟期	8.35 ± 1.24	6.13 ± 0.28	1.15 ± 0.16	67.34 ± 4.12	43.68 ± 1.25
	平均值	8.91 ± 1.53c	6.94 ± 0.43b	1.25 ± 0.13bc	75.86 ± 4.58b	43.00 ± 1.98a
A2	返青期	12.05 ± 1.69	7.74 ± 0.52	1.36 ± 0.11	82.64 ± 3.25	42.56 ± 1.4
	拔节期	11.13 ± 1.03	7.35 ± 0.26	1.32 ± 0.16	81.31 ± 3.69	43.12 ± 1.63
	抽穗期	9.24 ± 1.52	6.47 ± 0.34	1.37 ± 0.15	73.12 ± 4.57	43.56 ± 1.75
	成熟期	8.56 ± 1.34	6.14 ± 0.28	1.24 ± 0.21	69.24 ± 3.98	43.59 ± 1.74
	平均值	10.25 ± 1.27b	6.93 ± 0.35b	1.32 ± 0.23b	76.55 ± 4.36b	43.21 ± 1.36a
A3	返青期	12.37 ± 1.69	7.01 ± 0.41	1.69 ± 0.14	86.90 ± 6.27	42.69 ± 1.59
	拔节期	11.58 ± 2.03	6.23 ± 0.38	1.53 ± 0.19	83.14 ± 5.38	43.02 ± 1.26
	抽穗期	10.45 ± 1.57	6.01 ± 0.17	1.27 ± 0.24	74.52 ± 6.42	43.21 ± 1.52
	成熟期	10.32 ± 1.03	6.12 ± 0.29	1.20 ± 0.22	71.63 ± 3.85	43.58 ± 1.03
	平均值	11.18 ± 2.14a	6.34 ± 0.37c	1.42 ± 0.16a	79.03 ± 6.25a	43.13 ± 1.07a
A4	返青期	11.35 ± 2.06	7.98 ± 0.30	1.34 ± 0.18	79.21 ± 5.68	42.97 ± 1.54
	拔节期	10.27 ± 1.86	7.65 ± 0.29	1.21 ± 0.31	75.35 ± 6.10	43.35 ± 1.53
	抽穗期	9.58 ± 1.32	7.21 ± 0.31	1.07 ± 0.21	68.44 ± 5.09	43.68 ± 1.23
	成熟期	7.24 ± 1.69	7.23 ± 0.27	1.14 ± 0.24	61.82 ± 4.32	43.52 ± 1.06
	平均值	9.61 ± 1.05bc	7.52 ± 0.15a	1.19 ± 0.17c	71.18 ± 3.17c	43.38 ± 1.49a

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。下同。

2.2 不同种植密度对小麦根际土壤养分的影响

由表2可知,A1、A2处理下,土壤全磷含量随着生育进程呈先降低后增加再降低趋势,A4处理下,随着生育进程呈先增加后降低趋势,局部有所波动。不同种植密度处理下小麦根际土壤有机碳含量平均范围在9.92~11.79 g/kg之间,土壤全氮含量平均范围在1.31~1.46 g/kg之间,全磷含量平均范围在1.11~1.13 g/kg之间,全钾含量平均范围在29.74~34.51 g/kg之间,有效氮含量平均范围在38.68~

45.39 mg/kg之间,有效磷含量平均范围在50.30~62.15 mg/kg之间。整个生长季小麦根际土壤有机碳、全氮、全钾、有效氮、有效磷平均含量随种植密度的增加呈先增加后降低趋势。A3处理下,整个生长季小麦根际土壤有机碳含量最高,并且与A2差异不显著,二者显著高于其他处理;A3处理下,整个生长季土壤全氮含量显著高于其他处理,A1、A2与A4处理之间差异并不显著;不同密度处理下小麦整个生长季土壤全磷含量差异均不显著;A3处理下小麦整个生长季土壤全钾

表2 不同种植密度下小麦根际土壤养分

处理	生育期	有机碳含量 (g/kg)	全氮含量 (g/kg)	全磷含量 (g/kg)	全钾含量 (g/kg)	有效氮含量 (mg/kg)	有效磷含量 (mg/kg)
A1	返青期	8.23 ± 1.03	1.15 ± 0.13	1.12 ± 0.13	25.23 ± 2.03	26.71 ± 3.52	42.05 ± 3.46
	拔节期	10.58 ± 1.26	1.43 ± 0.23	1.07 ± 0.15	29.57 ± 2.65	39.47 ± 2.59	46.78 ± 5.62
	抽穗期	11.02 ± 1.52	1.23 ± 0.25	1.15 ± 0.05	31.56 ± 2.12	42.31 ± 2.84	53.15 ± 4.32
	成熟期	11.35 ± 1.85	1.56 ± 0.18	1.13 ± 0.06	32.58 ± 2.26	46.24 ± 3.67	59.23 ± 4.98
	平均值	10.30 ± 1.41b	1.34 ± 0.26b	1.12 ± 0.09a	29.74 ± 2.85b	38.68 ± 1.58d	50.30 ± 5.13c
A2	返青期	10.24 ± 1.63	1.20 ± 0.41	1.19 ± 0.16	27.46 ± 2.59	36.41 ± 2.54	49.28 ± 5.47
	拔节期	11.41 ± 1.49	1.24 ± 0.25	1.05 ± 0.18	30.58 ± 2.74	42.15 ± 2.69	53.47 ± 3.46
	抽穗期	12.03 ± 1.25	1.35 ± 0.14	1.13 ± 0.14	34.24 ± 2.69	43.26 ± 2.85	60.17 ± 5.23
	成熟期	12.57 ± 1.74	1.59 ± 0.19	1.16 ± 0.13	35.69 ± 2.58	49.87 ± 2.36	63.41 ± 4.36
	平均值	11.56 ± 0.36a	1.35 ± 0.36b	1.13 ± 0.15a	31.99 ± 2.31b	42.92 ± 3.10b	56.58 ± 5.02b
A3	返青期	9.58 ± 0.69	1.31 ± 0.25	1.24 ± 0.08	28.07 ± 2.35	39.17 ± 2.69	52.03 ± 3.98
	拔节期	10.41 ± 1.25	1.26 ± 0.28	1.13 ± 0.11	34.23 ± 2.59	42.45 ± 2.41	58.36 ± 4.06
	抽穗期	13.02 ± 1.37	1.57 ± 0.17	0.89 ± 0.17	37.14 ± 2.14	46.77 ± 3.62	68.37 ± 7.28
	成熟期	14.15 ± 1.45	1.68 ± 0.19	1.18 ± 0.16	38.59 ± 1.59	53.18 ± 3.12	69.84 ± 6.35
	平均值	11.79 ± 1.20a	1.46 ± 0.22a	1.11 ± 0.13a	34.51 ± 3.56a	45.39 ± 2.54a	62.15 ± 3.58a
A4	返青期	8.26 ± 1.06	1.14 ± 0.17	1.05 ± 0.09	27.13 ± 2.74	30.25 ± 2.96	45.13 ± 2.39
	拔节期	9.13 ± 0.95	1.25 ± 0.26	1.16 ± 0.07	29.78 ± 2.31	35.14 ± 2.37	53.10 ± 3.57
	抽穗期	10.24 ± 1.05	1.38 ± 0.25	1.23 ± 0.12	30.25 ± 3.51	46.23 ± 3.01	60.41 ± 2.77
	成熟期	12.03 ± 1.14	1.46 ± 0.23	1.08 ± 0.15	33.42 ± 1.87	49.52 ± 2.17	62.54 ± 3.14
	平均值	9.92 ± 1.26c	1.31 ± 0.18b	1.13 ± 0.13a	30.15 ± 2.47b	40.29 ± 3.98c	55.30 ± 4.58b

含量显著高于其他处理,A1、A2与A4处理之间差异不显著;不同密度处理下小麦整个生长季土壤有效氮含量差异显著;A3处理下小麦整个生长季土壤有效磷含量显著高于其他处理,A2与A4处理之间差异并不显著,但显著高于A1处理。

2.3 不同种植密度对小麦根际土壤微生物数量的影响

由表3可知,不同种植密度处理下小麦根际土壤细菌、放线菌、真菌数量均随着小麦生育进程呈逐渐增加趋势。不同种植密度处理下小麦根际土壤细菌数量平均范围在 $31.81 \times 10^6 \sim 60.18 \times 10^6$ 个/g之间,土壤放线菌平均数量范围在 $26.59 \times 10^5 \sim 39.20 \times 10^5$ 个/g之间,土壤真菌数量平均范围在 $11.98 \times 10^3 \sim 25.36 \times 10^3$ 个/g之间。不同密度处理下小麦整个生长季土壤细菌、放线菌、真菌数量差异均显著,土壤细菌数量由高到低依次为A3 > A4 > A2 > A1,土壤放线菌数量由高到低依次为A4 > A1 > A3 > A2,土壤真菌数量由高到低依次为A4 > A3 > A2 > A1。

2.4 不同种植密度对小麦根际土壤酶活的影响

由表4可知,不同种植密度处理下,小麦根际土壤脲酶、磷酸酶、蛋白酶、蔗糖酶、过氧化氢酶活性均随着小麦生育进程呈逐渐增加趋势;不同种植密度下小麦根际土壤脲酶活性平均范围在 $4.72 \sim 5.40$ mg/(g·24h)之间,土壤磷酸酶活性平均范围在 $1.34 \sim 1.53$ mg/(g·24h)之间,土壤蛋白酶活性平均范围在 $41.84 \sim 47.58$ mg/(g·24h)之间,土壤蔗糖酶活性平均范围在 $5.23 \sim 9.60$ mg/(g·24h)之间,土壤过氧化氢酶活性平均范围在 $5.80 \sim 10.70$ mL/(g·20min)之间。A3处理下,小麦整个生长季土壤脲酶活性最高,并且与A2处理没有显著差异,二者显著高于其他处理,A1与A4差异并不显著。不同种植密度处理下,小麦整个生长季土壤磷酸酶活性差异均不显著;A3处理下,小麦整个生长季土壤蛋白酶活性显著高于其他处理,A1与A4处理差异并不显著;A3处理

表3 不同种植密度下小麦根际土壤微生物数量

处理	生育期	细菌数量 ($\times 10^6$ 个/g)	放线菌数量 ($\times 10^5$ 个/g)	真菌数量 ($\times 10^3$ 个/g)
A1	返青期	25.14 ± 2.69	23.56 ± 1.26	9.74 ± 1.23
	拔节期	23.42 ± 3.18	38.46 ± 1.85	10.25 ± 2.56
	抽穗期	35.41 ± 2.45	35.17 ± 1.69	12.58 ± 1.07
	成熟期	43.25 ± 2.78	42.34 ± 2.03	15.35 ± 1.59
	平均值	31.81 ± 3.16d	34.88 ± 2.56b	11.98 ± 1.41d
A2	返青期	35.47 ± 2.04	19.18 ± 1.87	10.27 ± 2.04
	拔节期	40.21 ± 3.46	26.45 ± 1.69	13.74 ± 1.03
	抽穗期	43.18 ± 2.18	28.17 ± 2.04	16.58 ± 0.87
	成熟期	52.46 ± 2.06	32.56 ± 2.13	18.53 ± 0.95
	平均值	42.83 ± 3.05c	26.59 ± 2.46d	14.78 ± 1.13c
A3	返青期	49.15 ± 3.46	21.38 ± 2.58	15.13 ± 1.26
	拔节期	53.18 ± 3.69	26.41 ± 1.96	20.41 ± 1.41
	抽穗期	65.14 ± 3.74	31.25 ± 1.87	26.52 ± 1.20
	成熟期	73.25 ± 2.69	36.97 ± 1.68	29.74 ± 2.31
	平均值	60.18 ± 2.85a	29.00 ± 2.14c	22.95 ± 2.41b
A4	返青期	43.56 ± 2.73	31.72 ± 2.16	17.24 ± 2.05
	拔节期	51.27 ± 3.26	34.85 ± 2.54	23.54 ± 1.54
	抽穗期	56.38 ± 3.58	43.25 ± 1.86	28.52 ± 1.98
	成熟期	61.74 ± 3.69	46.98 ± 2.34	32.14 ± 1.87
	平均值	53.24 ± 2.74b	39.20 ± 3.03a	25.36 ± 1.69a

下,小麦整个生长季土壤蔗糖酶活性显著高于其他处理,A2与A4处理差异并不显著,显著高于A1处理;A3处理下,小麦整个生长季土壤过氧化氢酶活性显著高于其他处理,A1、A2与A4处理差异并不显著,显著低于A3处理。

2.5 不同种植密度对小麦生理特性的影响

由表5可知,不同种植密度下,小麦叶绿素a、叶绿素b、可溶性糖、可溶性蛋白含量均随着小麦生育进程呈逐渐增加趋势;不同种植密度下,小麦叶绿素a含量平均范围在

表4 不同种植密度下生长期小麦土壤酶活性

处理	生育期	脲酶活性 [mg/(g·24 h)]	磷酸酶活性 [mg/(g·24 h)]	蛋白酶活性 [mg/(g·24 h)]	蔗糖酶活性 [mg/(g·24 h)]	过氧化氢酶活性 [mL/(g·20 min)]
A1	返青期	4.18 ± 0.56	1.15 ± 0.23	36.49 ± 3.56	4.51 ± 0.56	3.17 ± 0.68
	拔节期	4.56 ± 0.89	1.21 ± 0.24	41.37 ± 3.89	5.02 ± 0.78	5.14 ± 0.72
	抽穗期	5.03 ± 0.47	1.43 ± 0.19	43.25 ± 4.23	5.13 ± 0.62	6.38 ± 0.89
	成熟期	5.12 ± 0.68	1.56 ± 0.27	46.23 ± 4.15	6.25 ± 0.69	8.52 ± 0.74
	平均值	4.72 ± 0.79 _b	1.34 ± 0.18 _a	41.84 ± 3.42 _c	5.23 ± 0.73 _c	5.80 ± 0.99 _b
A2	返青期	4.67 ± 0.68	1.37 ± 0.25	42.74 ± 3.59	5.36 ± 0.75	4.12 ± 0.35
	拔节期	5.10 ± 0.52	1.42 ± 0.17	43.15 ± 4.85	5.14 ± 0.81	5.14 ± 0.61
	抽穗期	5.43 ± 0.67	1.62 ± 0.36	46.58 ± 5.36	6.53 ± 0.74	6.95 ± 0.54
	成熟期	5.68 ± 0.75	1.69 ± 0.26	48.29 ± 5.14	9.56 ± 0.65	8.29 ± 0.59
	平均值	5.22 ± 0.73 _a	1.53 ± 0.18 _a	45.19 ± 4.23 _b	6.65 ± 0.89 _b	6.13 ± 0.67 _b
A3	返青期	4.78 ± 0.62	1.37 ± 0.26	43.58 ± 4.72	6.14 ± 0.92	5.19 ± 0.83
	拔节期	5.21 ± 0.58	1.42 ± 0.23	46.21 ± 4.31	7.52 ± 1.03	7.56 ± 0.75
	抽穗期	5.63 ± 0.71	1.53 ± 0.18	48.17 ± 3.56	11.47 ± 1.05	13.7 ± 1.36
	成熟期	5.97 ± 0.69	1.78 ± 0.35	52.36 ± 3.17	13.25 ± 0.56	16.34 ± 1.08
	平均值	5.40 ± 0.58 _a	1.53 ± 0.19 _a	47.58 ± 2.42 _a	9.60 ± 0.41 _a	10.70 ± 1.27 _a
A4	返青期	4.35 ± 0.64	1.24 ± 0.26	38.21 ± 3.95	5.14 ± 0.58	3.74 ± 0.15
	拔节期	4.68 ± 0.79	1.21 ± 0.19	42.17 ± 4.68	7.23 ± 0.97	5.12 ± 0.96
	抽穗期	5.11 ± 0.82	1.46 ± 0.62	43.26 ± 6.27	6.38 ± 0.94	6.78 ± 0.75
	成熟期	5.24 ± 0.84	1.58 ± 0.51	47.25 ± 5.18	8.52 ± 1.15	9.41 ± 0.68
	平均值	4.85 ± 0.91 _b	1.37 ± 0.31 _a	42.72 ± 5.36 _c	6.82 ± 0.84 _b	6.26 ± 0.77 _b

表5 不同种植密度下小麦生理特性

处理	生育期	叶绿素 a 含量 (mg/g)	叶绿素 b 含量 (mg/g)	可溶性糖含量 (%)	可溶性蛋白含量 (μg/g)
A1	返青期	0.78 ± 0.13	0.53 ± 0.08	0.09 ± 0.02	82.35 ± 6.99
	拔节期	0.83 ± 0.24	0.58 ± 0.09	0.23 ± 0.04	95.26 ± 6.87
	抽穗期	1.24 ± 0.56	0.67 ± 0.12	0.29 ± 0.06	98.74 ± 9.35
	成熟期	1.56 ± 0.37	0.71 ± 0.13	0.37 ± 0.07	104.52 ± 7.26
	平均值	1.10 ± 0.26 _c	0.62 ± 0.08 _c	0.25 ± 0.03 _b	95.22 ± 5.18 _b
A2	返青期	0.92 ± 0.24	0.62 ± 0.11	0.18 ± 0.07	89.21 ± 9.58
	拔节期	1.32 ± 0.38	0.61 ± 0.15	0.29 ± 0.09	98.14 ± 8.37
	抽穗期	1.68 ± 0.39	0.75 ± 0.14	0.37 ± 0.11	102.73 ± 8.96
	成熟期	1.73 ± 0.56	0.79 ± 0.09	0.45 ± 0.08	113.42 ± 11.36
	平均值	1.41 ± 0.57 _b	0.69 ± 0.08 _c	0.32 ± 0.06 _a	100.88 ± 13.28 _a
A3	返青期	1.35 ± 0.95	0.76 ± 0.16	0.21 ± 0.03	91.36 ± 9.14
	拔节期	1.86 ± 0.84	0.81 ± 0.13	0.32 ± 0.05	98.65 ± 6.37
	抽穗期	2.42 ± 0.52	0.83 ± 0.24	0.42 ± 0.08	106.78 ± 10.45
	成熟期	2.63 ± 0.67	1.12 ± 0.21	0.49 ± 0.07	119.57 ± 13.46
	平均值	2.07 ± 0.64 _a	0.88 ± 0.17 _a	0.36 ± 0.06 _a	104.09 ± 10.74 _a
A4	返青期	1.12 ± 0.38	0.68 ± 0.13	0.13 ± 0.03	85.21 ± 9.85
	拔节期	1.35 ± 0.52	0.71 ± 0.12	0.19 ± 0.04	91.35 ± 8.63
	抽穗期	1.31 ± 0.69	0.79 ± 0.15	0.28 ± 0.06	95.14 ± 7.52
	成熟期	1.43 ± 0.72	0.92 ± 0.32	0.35 ± 0.05	103.53 ± 8.24
	平均值	1.30 ± 0.68 _b	0.78 ± 0.27 _b	0.24 ± 0.03 _b	93.81 ± 9.10 _b

1.10 ~ 2.07 mg/g 之间,叶绿素 b 含量平均范围在 0.62 ~ 0.88 mg/g 之间,可溶性糖含量平均范围在 0.24% ~ 0.36% 之间,可溶性蛋白含量平均范围在 93.81 ~ 104.09 μg/g 之间。A3 处理下,小麦整个生长季叶绿素 a 含量显著高于其他处理,A2 与 A4 处理之间差异并不显著,二者显著高于 A1 处理。A3 处理下,小麦整个生长季叶绿素 b 含量显著高于其他处理,A1 与 A2 处理差异并不显著,二者显著低于 A4 处理;小麦整个生长季,A2 与 A3 处理下小麦可溶性糖含量差异并

不显著,二者显著高于 A1、A4 处理。小麦整个生长季,小麦可溶性蛋白含量变化趋势和可溶性糖含量变化趋势相同。

2.6 不同种植密度对小麦籽粒产量的影响

由图 1 可知,不同种植密度处理下,小麦籽粒产量随着密度的增加呈先增加后降低趋势,小麦籽粒产量由高到低依次表现为 A3 > A4 > A2 > A1,其中 A3 处理下小麦籽粒产量显著高于其他处理,A2 与 A4 处理下小麦籽粒产量差异不显著,但显著高于 A1 处理。

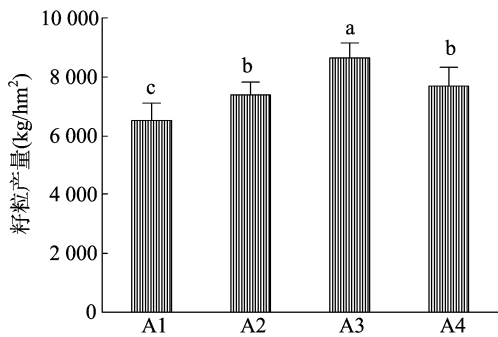


图1 不同种植密度对小麦籽粒产量的影响

3 结论与讨论

根际是一个很特别的微区域,由于植物根系的影响,使其周围的微区域在物理、化学、生物特性方面与土体主体不同^[12-13]。本研究结果表明,增加种植密度增加了小麦根际土壤含水量、电导率、总孔隙度,降低了土壤 pH 值。适宜的 pH 值有利于土壤微生物活动和植物生长,pH 值的降低致使根区酸化,从而增加土壤养分的吸收和利用、土壤酶活性及微生物的繁殖。本研究结果表明,增加种植密度降低了小麦根际土壤 pH 值,主要是由于根系对土壤的穿插和扩展,改善了土壤结构并提高了土壤养分,阴阳离子溶解度增加,导致电导率、全盐含量增加。土壤养分是物质循环、能量流动的主要驱动力,对土壤有机质的分解、腐殖质的形成、养分的转化及循环等过程具有重要作用^[14]。增加种植密度影响了小麦种群的生长和更新,并且在繁殖过程中提高了土壤养分,土壤养分的改变会对小麦做出进一步的反馈调节。本研究结果表明,相同生境条件下,增加种植密度对土壤养分、酶活性及微生物数量均表现为一定程度的增加效应,与前人的研究结果^[12,15]相一致。由此可知,合理的种植密度有利于植被-土壤系统营养物质的循环、腐殖质的形成、土壤养分的提高,这主要是由于较低的 pH 值增加了根际土壤养分的吸收和利用,在生长繁殖过程中促进土壤酶活性及微生物量的增加,这也是多种环境因素共同引起的^[13]。本研究结果表明,增加种植密度增加了土壤酶活性,这与前人的研究结果^[12,15]相似,这主要是由于根系通过 pH 值的酸化后能提高养分矿化速率和土壤养分的有效性,有利于微生物群落的生长和增殖,通过正反馈调节而相互刺激,从而提高土壤生态系统的物质循环、能量流动。

不同种植密度下,小麦叶绿素 a、叶绿素 b、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量均随着小麦生育进程呈逐渐增加趋势。叶绿素作为光合作用的物质基础和光敏化剂,在光合作用过程中起着接受和转换能量的作用,其含量的增加有助于光合作用的进行。可溶性糖含量、可溶性蛋白含量在植物生长发育过程中起着非常重要的作用^[11]。提高种植密度能够增加小麦叶绿素 a 和 b、可溶性蛋白、可溶性糖含量,一方面说明小麦能够适应密度环境,另一方面说明了可溶性糖、可溶性蛋白作为机体构建物质,参与营养期干物质的积累^[16]。此外,合适的种植密度对小麦可溶性糖、可溶性蛋白含量均有显著的促进作用,在小麦不同生长时期,增加种植密度对小麦生长均有一定的促进作用,其增加效果不尽一致,总体表现为成熟

期较大,这与小麦合成与分解营养物质的平衡有关,还有可能是生物(微生物、土壤动物、植物根系)和非生物因子(水热条件)不同时期波动综合调控的结果。

研究表明,不同作物的根际有其特定的微生物群落,同一作物在不同生育时期和营养状态下,其根际微生物数量也呈现一定的动态变化^[15]。本试验结果表明,不同种植密度下,小麦根际土壤微生物均以细菌最多,占微生物总数的 90% 以上,其次是放线菌、真菌,由此可知,种植密度对于小麦根际土壤微生物菌落起着不同的效果,总体来说,增加种植密度显著提高了微生物数量。小麦根际土壤细菌数量随种植密度的增加呈先增加后降低趋势,土壤放线菌数量随种植密度的增加呈先降低后增加趋势,土壤真菌数量随种植密度的增加呈增加趋势,可见,植株根系在不同状况下对细菌、放线菌、真菌影响的不同。根际中微生物组成受植物种类、土壤类型、土壤管理措施、微生物相互作用和其他环境因素等的影响,可能会有助于一些根际微生物而不利另一些根际微生物生长,其中微生物数量在小麦成熟期时数量较多,这可能是由于植株对养分需求增多,从而造成根际养分相对富集,微生物总量增加^[16]。此外,小麦生长过程中以及不同群体密度之间微生物数量的变化,反映了小麦生长影响根际微生物的数量,根系微生物的大量繁殖和旺盛活动又反过来对小麦的生长发育产生影响。因此在生产实践中应采取科学合理的栽培管理措施,使土壤微生物有利于小麦的生长发育和产量的提高。

种植密度和产量之间符合最高密度法则,当密度超过某一值时其产量趋于恒定^[17]。本研究结果表明,不同种植密度下,小麦籽粒产量随着密度的增加呈先增加后降低趋势,当种植密度达到 A3 时,小麦籽粒产量最高,种植密度超过 A3 时,小麦籽粒产量急剧降低。由此可知,A3 处理为小麦的最佳种植密度,这可能是由于小麦在低密度处理下植株量及根量较小,导致根系分泌物减少;过高种植密度下,由于营养竞争加剧,小麦有效光合能力下降,影响光合产物。A3 处理下,小麦群体处于合理的状态下,根系总量较多,地上部生长状况也较良好,使得小麦籽粒产量最高。

参考文献:

- [1] Bulson H J, Snaydon R W, Stopes C E. Effects of plant density on intercropped wheat and field beans in an organic farming system[J]. The Journal of Agricultural Science, 1997, 128(1): 59-71.
- [2] Carlson H L, Hill J E. Wild oat (avena - fatua) competition with spring wheat: plant density effects[J]. Weed Science, 1985, 33(2): 176-181.
- [3] Li L, Sun J H, Zhang F S, et al. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping: I. Yield advantage and interspecific interactions on nutrients[J]. Field Crops Research, 2001, 71(2): 123-137.
- [4] Weiner J, Griepentrog H W, Kristensen L. Suppression of weeds by spring wheat triticum aestivum increases with crop density and spatial uniformity[J]. Journal of Applied Ecology, 2001, 38(4): 784-790.
- [5] Richards R A. A tiller inhibitor gene in wheat and its effect on plant growth[J]. Crop and Pasture Science, 1988, 39(5): 749-757.
- [6] 丛新军, 吴科, 钱兆国, 等. 超高产条件下种植密度对泰山 21 号群体动态、干物质积累和产量的影响[J]. 山东农业科学, 2004(4): 16-18.

李金峰, 聂兆君, 赵鹏, 等. 畜禽粪便配施对冬小麦产量及 Cu、Zn、As 在植株累积和土壤中垂直分布的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(4): 137-140. doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.04.035

畜禽粪便配施对冬小麦产量及 Cu、Zn、As 在植株累积和土壤中垂直分布的影响

李金峰, 聂兆君, 赵鹏, 刘世亮, 于华, 苏红丽, 高巍, 刘红恩

(河南农业大学资源与环境学院/河南省高校农业资源与环境工程技术研究中心, 河南郑州 450002)

摘要:为了研究畜禽粪便在冬小麦上的应用效果及对植株、土壤中重金属 Cu、Zn、As 含量变化的影响,于2013年10月至2014年6月在河南农业大学许昌校区农场进行田间小区试验。结果发现:在常规施肥的基础上配施一定量的畜禽粪便,可以显著提高冬小麦产量及其产量构成要素,增产率达到17.23%,然而过量的畜禽粪便会导致冬小麦后期倒伏减产。另外,随着畜禽粪便配施量的增加,冬小麦植株各部位对重金属 Cu、Zn、As 的累积量及总累积量显著增加,同时重金属 Cu、Zn、As 含量在土壤垂直分布中明显增加。以上结果表明,农业生产中配施畜禽粪便对食品安全及土壤环境具有一定的潜在风险。因此,合理施用畜禽粪便对我国农业生产的增产增效,实现粮食安全,实现资源节约型、环境优化型可持续发展现代农业具有重要意义。

关键词: 畜禽粪便; 冬小麦; 重金属; 累积量; 土壤; 垂直分布

中图分类号: S512.101; S141.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)04-0137-04

进入20世纪90年代以来,我国氮肥用量、化肥生产总量和施肥总量相继跃居世界首位^[1]。其中氮肥用量达到全球氮肥用量的36%以上^[2],使我国成为全球第一氮肥消费大国。然而,随着我国肥料用量的逐年增加,肥料利用率并没有明显提高^[3]。每年有约1500万t氮素(约占氮肥用量的60%)损失进入大气和水体^[4]。我国农业生产面临高肥料投

入量和低肥料利用率的情况,导致大量农田出现土壤板结、酸碱pH值变化、活性降低等问题,进一步引发生产效益降低、能源浪费和环境污染等一系列问题,使农业可持续发展陷入困境。在此背景下,“有机农业”“生态农业”作为一种资源循环利用模式,以生产优质、安全、生态的农产品,减缓不合理施肥对资源和环境造成的严重压力为目标,取得了一定的进展。因此,为了实现农业的可持续发展,构建资源节约型、环境友好型新型农业模式,加大有机肥的投入量是必由之路。

我国有机肥的来源非常广泛并资源丰富,2008年全国有机肥料生产企业调查结果显示,我国畜禽粪便有机肥料资源约达22.4亿t,畜禽粪便成为我国有机肥料生产的主要原料来源,其合理施用对提高农田土壤肥力起着重要的作用^[5],具有增加土壤养分、增强土壤微生物活性及改善作物品质等作用^[6-8]。但是越来越多的研究表明,大量使用畜禽粪便对大气、土壤和水体等造成潜在威胁。一方面,有机肥被认为是

收稿日期:2015-09-18

基金项目:河南省科技攻关项目“畜禽废弃对农田土壤环境的影响研究”;河南省重点科技攻关项目(编号:152102110064);国家自然科学基金(编号:41201286);农村领域国家科技计划(编号:2012BAD05B0207)。

作者简介:李金峰(1989—),男,河南方城人,硕士研究生,研究方向为植物微量元素营养机理。E-mail:15039098020@163.com。

通信作者:刘红恩,博士,副教授,研究方向为微量元素营养机理和农业废弃物综合利用。E-mail:liuhongen7178@126.com。

[7] Lloveras J, Manent J, Viudas J, et al. Seeding rate influence on yield and yield components of irrigated winter wheat in a Mediterranean climate[J]. *Agronomy Journal*, 2004, 96(5): 1258-1265.

[8] 屈会娟, 李金才, 沈学善, 等. 种植密度和播期对冬小麦品种兰考矮早八干物质和氮素积累与转运的影响[J]. *作物学报*, 2009, 35(1): 124-131.

[9] 王燕, 王兵, 赵广东, 等. 江西大岗山3种林型土壤水分物理性质研究[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(1): 151-153, 173.

[10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[11] 李合生, 孙群, 赵世杰, 等. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.

[12] van Elsas J D, Trevors J T, Starodub M E. Bacterial conjugation between pseudomonads in the rhizosphere of wheat[J]. *FEMS Microbiology Letters*, 1988, 53(5): 299-306.

[13] Liljeroth E, van Veen J A, Miller H J. Assimilate translocation to the

rhizosphere of two wheat lines and subsequent utilization by rhizosphere microorganisms at two soil nitrogen concentrations[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, 22(8): 1015-1021.

[14] Junk W J, Bayley P B, Sparks R E. The flood pulse concept in river-floodplain systems[J]. *Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1989, 106(1): 110-127.

[15] 马冬云, 郭天财, 查菲娜, 等. 不同种植密度对小麦根际土壤微生物数量及土壤酶活性的影响[J]. *华北农学报*, 2008, 23(3): 154-157.

[16] 王之杰, 郭天财, 王化岑, 等. 种植密度对超高产小麦生育后期光合特性及产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2001, 21(3): 64-67.

[17] 刘寿东, 杨再强, 苏天星, 等. 定植密度对日光温室甜椒干物质生产与分配影响的模拟研究[J]. *生态学报*, 2010, 30(15): 4056-4064.