植物营养与肥料学报 2010,16(3): 575-583
Plant Nutrition and Fertilizer Science

超高产栽培条件下冬小麦对锰的吸收、积累和分配

党红凯, 李瑞奇, 孙亚辉, 张馨文, 孟 建, 刘红彬, 李雁鸣*
(河北农业大学农学院,河北保定 071001)

摘要: 2004~2006 年冬小麦生长期间,通过田间取样研究了超高产 ($\geq$9000 kg/hm^2) 栽培条件下冬小麦对锰的吸收、积累和分配特点。结果表明,地上部不同器官的含锰量为 11.5~137.7 mg/kg(干重)。叶片的含锰量在生育期间始终最高,开花后穗部和子粒的含锰量也较高。小麦各器官对锰的积累量,生育前期以叶片中最高,生育后期以子粒最高。各品种全株的锰积累量均随生育进程而增加,在开花后 10 d 到成熟期达到最大值 865.5~1350.0 g/hm^2。冬前、开花期和成熟期对锰的累进吸收百分率分别约为 12%、80%和 100%。小麦吸收的锰在孕穗期前主要分配在叶片中,达 50%以上; 成熟期锰在整个穗部(颖壳和子粒)的分配达 50%以上。全生育期小麦对锰的阶段吸收量和日吸收量均为双峰曲线,第一个峰在冬前,第二个峰在起身到开花期。说明冬前和生育中期是超高产冬小麦吸收锰的关键阶段,应通过播种前浸、拌种与生育中期叶面喷施相结合,保证关键吸收阶段充足的锰供应。

关键词: 超高产; 冬小麦; 锰; 吸收; 积累; 分配
中图分类号: S512.1$^+$1; S143.7　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1008-505X(2010)03-0575-09

Absorption, accumulation and distribution of manganese in winter wheat cultivated under super-high-yielding conditions

DANG Hong-kai, LI Rui-qi, SUN Ya-hui, ZHANG Xin-wen, MENG Jian, LIU Hong-bin, LI Yan-ming*
(*College of Agronomy, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China*)

Abstract: In order to clarify the characteristics of manganese (Mn) absorption, accumulation and distribution in winter wheat cultivated under super-high-yielding ($\geq$9000 kg/ha) conditions, a field experiment was conducted in Gaocheng County, Hebei Province during 2004-2006. Six winter wheat cultivars, SM14, SM12, JF703 and SX828 during 2004-2005, and TM1, SM12, SX531 and SX828 during 2005-2006, were used as experimental materials. The growing area for each cultivar was 1 hectare, divided into three subplots of 3333 m^2 as three replications. Plant samples were collected from the plots at each growing stage for Mn concentration determination in laboratory. The main results showed that, the concentrations of Mn in various above-ground organs of wheat ranged from 11.5 to 137.7 mg/kg. The concentration of Mn in leaf blades was always the highest among all organs during the growing period, with the order of leaf blade $\geq$ leaf sheath > stem > spike from pre-winter to the booting stage, while the order of leaf blade > spike $\geq$ grain > leaf sheath $\approx$ stem from the anthesis to maturity stages. Among all above-ground organs, the highest accumulation amounts of Mn were in leaf blades during early growing period, but in grains during late period. The accumulation amounts of Mn in the whole plants of all cultivars were increased with growing process, and reached to the maximum values 865.5-1350.0 g/ha during ten days after anthesis to maturity. The accumulative percentages of Mn by wheat plants were about 12%, 80%, and 100% of the total accumulation at pre-winter, anthesis and maturity respectively. During the pre-booting period, the Mn absorbed by wheat plants was mainly distributed in leaf blades and sheaths, especially in blades, where the distribution percentage was higher than 50%. At maturity, however, the distribution percentage of Mn in spikes was

收稿日期: 2009-07-13　　**接受日期**: 2009-10-22
基金项目: 国家"粮食丰产科技工程"河北省课题(2006BAD02A08、2004BA520A07); 国家小麦产业技术体系建设专项资金资助。
作者简介: 党红凯(1979—),男,河北省巨鹿县人,博士研究生,主要从事作物栽培生理研究。
* 通讯作者 Tel: 0312-7528117, E-mail: nxzwst@hebau.edu.cn, liym315@126.com

higher than 50%, which was higher than those in other organs. The phasic and daily absorption amounts of Mn by wheat plants during their growing periods were all in double peak curves. The first peak with a lower peak value occurred before winter, and the second with a higher peak value occurred during the middle growing period from the double ridge to anthesis. These results demonstrate that, pre-winter and middle growing periods are the key periods of Mn absorption by super-high-yielding winter wheat. The supply of Mn for these key absorption periods should be satisfied by presowing seed soaking or mixing and foliar application during the middle growing period.

Key words: super-high-yielding; winter wheat; manganese(Mn); absorption; accumulation; distribution

锰是对小麦生长有重要影响的微量元素[1]。锰在小麦体内起重要生理作用,能够提高呼吸速率,并作为叶绿体结构成分参与光合作用[2],缺锰易造成叶绿体结构稳定性变差[3]。关于锰对小麦生长发育及产量和品质等方面的影响,已有很多研究,如锰与叶绿素及其他酶类的关系[4],不同基因型的锰营养特点[5],锰对产量的影响[3]及在改善子粒品质中的作用[6]等。杨建堂等[7]和张国印等[8]分别对 8 t/hm^{2}和 4.5 t/hm^2 不同产量水平小麦的锰吸收和分配做了初步研究,但对 9 t/hm^2 超高产水平下[9]小麦锰吸收和分配的系统研究鲜有报道。河北平原是我国小麦主产区之一,关于该地区生态条件和超高产栽培条件下冬小麦的锰营养特点也未见报道。明确该地区超高产栽培条件下冬小麦对锰的吸收、积累和分配特点,对深刻认识该地区小麦的锰素营养特点和指导锰素施肥,具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验设计

田间试验于 2004～2006 年在河北省藁城市进行。前茬作物夏玉米收获后秸秆全部还田。试验田 0—20 cm 耕层基础肥力为:有机质 16.9～22.4 g/kg、全氮 0.75～0.97 g/kg、碱解氮 116.9～135.4 mg/kg、速效磷 18.8～34.4 mg/kg、速效钾 108.3～154.5 mg/kg、有效锰 5.15～8.08 mg/kg(7.04 ± 0.92 mg/kg)。整地前每公顷施尿素(含 N 46%)150 kg,磷酸二铵(含 N 18%、P_2O_5 46%)300 kg,氯化钾(含 K_2O 60%)150 kg;拔节期追尿素 300 kg/hm^2。折合每公顷总施肥量为 N 261 kg、P_2O_5 138 kg,K_2O 90 kg。

2004～2005 年度采用石麦 14、石麦 12、冀丰 703 和石新 828 等 4 个品种(分别用 SM14、SM12、JF703 和 SX828 表示);2005～2006 年度采用特麦 1 号、石麦 12、石新 531 和石新 828 等 4 个品种(分别用 TM1、SM12、SX531 和 SX828 表示)。每个品种面积为 1 hm^2,分为面积相等的 3 块(3333 m^2),取样时作为 3 次重复。2004 年 10 月 3 日播种,基本苗 239.2～320.5 × 10^4/hm^2,子粒产量 9029.0～9400.5 kg/hm^2。2005 年 10 月 6 日播种,不同品种的基本苗 232.5～372.0 × 10^4/hm^2,子粒产量 8751.0～9637.7 kg/hm^2(表 1)。2 年的产量均达到或接近超高产(9000 kg/hm^2)水平[9]。

表 1 各小麦品种的产量和产量构成因素

Table 1 Yield and yield components of different cultivars of winter wheat

2004～2005					2005～2006				
品种 Cultivar	穗数 Spike No. (× 10^4/hm^2)	穗粒数 Grain No. (No./spike)	千粒重 1000-grain wt. (g)	产量 Grain yield (kg/hm^2)	品种 Cultivar	穗数 Spike No. (× 10^4/hm^2)	穗粒数 Grain No. (No./spike)	千粒重 1000-grain wt. (g)	产量 Grain yield (kg/hm^2)
SM14	736.5	31.4	40.8	9057.7	TM1	473.7	48.4	44.6	9637.7
SM12	742.9	34.1	40.2	9029.0	SM12	813.9	34.3	37.5	9195.0
JF703	851.0	29.0	41.4	9122.7	SX531	547.0	37.5	42.0	8751.0
SX828	812.5	32.8	38.7	9400.5	SX828	729.3	31.3	42.7	8855.1

1.2 测定项目和方法

小麦不同生育期分别对每个品种各重复按 5 点法取样,每个样本苗期取样 50 株,拔节后取样 30 株。在实验室将植株洗净,按叶片、叶鞘、茎秆、穗、子粒分解,105℃烘箱中杀青 30 min,降温至 80℃烘干至恒重。冷却后称量各器官重量,并根据取样株

数和每公顷基本苗数计算每公顷该器官的总重量,用于计算锰的总积累量。

植株锰的测定:样品磨碎后用干灰化法灰化,用原子吸收分光光度法(AAS 法)[10]在 HACHT5000 原子吸收分光光度计上测定样品中的全锰含量。

土壤锰的测定:取 25 g 干土样,置 50 mL DTPA $-CaCl_2-$TEA 浸提液中,震荡 2 h。浸提液用原子吸收分光光度法(AAS 法),在 HACHT5000 原子吸收分光光度计上测定[11]。

2 结果与分析

2.1 小麦地上部各器官含锰量的变化动态

表 2 看出,各生育时期不同器官的含锰量为 11.5~137.7 mg/kg(干重)。其中,叶片的含锰量始终最高,冬前到开花期一直是叶片≥叶鞘>茎秆(拔节期开始)>穗部(孕穗期开始);开花以后穗部和子粒的含锰量也较高,大致为叶片>穗部≥子粒≥叶鞘>茎秆。2004~2005 年,叶片和叶鞘在起身期含锰量最高,之后开始降低,孕穗期降到最低后各品种又有不同程度的回升;2005~2006 年叶片含锰量从苗期到灌浆中期逐渐升高,之后略有降低;叶鞘拔节期含锰量最高,之后逐渐降低。茎秆在刚出现时含锰量最高,以后直到成熟期基本都在下降之中;穗部(开花后不含子粒,下同)含锰量在孕穗期最低,以后逐渐升高,到成熟期最高。子粒刚形成时含锰量最高,以后逐渐降低,直到成熟期。

2.2 地上部各器官中锰的吸收和积累规律

2.2.1 地上部各器官中锰的积累量 小麦各器官中锰的积累量,生育前期以叶片最高,生育后期以子粒最高(表 3)。不同时期比较,2 年中各品种叶片中锰的积累量都是从冬前开始逐渐增加,开花到开花后 10 d 达到最大值,之后到成熟逐渐降低。各时期叶鞘中锰的积累量均低于叶片,但变化趋势与叶片相似,最大值出现在孕穗及开花期;茎秆中锰的积累量也在开花到开花后 10 d 达到最大,以后下降,但 2005 年下降较缓慢,2006 年下降较迅速;穗部和子粒锰的积累量随生育进程逐渐增加。不同年份同时期同器官锰积累量有一定差异,可能与不同年份的气象条件有关。

表 4 可见,从冬前到孕穗期锰主要分布在叶片和叶鞘中,尤其在叶片中的分配占绝对优势,达 50%以上。开花期开始锰在叶片中的分配率明显降低,成熟期降到 20%左右。从冬前或起身期开始,锰在叶鞘中的分配率逐渐降低,成熟期降到最低。锰在茎秆中的分配率从拔节期开始逐渐提高,到开花期达到最高,且高于除叶片以外的其他器官,以后逐渐降低。开花后锰在子粒中的分配率迅速增加,成熟期远高于其他器官,达到 40%以上,即成熟期在整个穗部(颖壳和子粒)的分配率达到 50%以上。2 年中锰在各器官中的分配率生育前期差别不大,但生育中后期差异明显。

表 5 表明,各品种全株的锰积累量均随生育进程而增加,陆续在开花后 10 d、20 d 或成熟期达到最大值,一生的最大积累量为 865.5~1350.0 g/hm^2;2 年中冬前的积累量只有 94.6~169.3 g/hm^2,占全生育期的 9.4%~14.0%。从冬前到开花期,锰的总积累量稳定增加,开花后 10 d 以后直到成熟期基本稳定。不同品种比较,2004~2005 年 JF703 和 SX828 对锰的积累明显快于其他 2 个品种,中后期差异缩小,但成熟期仍以 JF703 和 SX828 的总积累量较大;2005~2006 年各时期的锰积累量明显低于上一年度,且品种间差异较小。2 年中各品种之间锰的累进吸收百分率在生育前期同样差异较大,但在孕穗期以后一般差异不显著。4 个品种平均,2 年间不同生育时期全株的锰积累量,除拔节期和孕穗期差异不显著外,其他时期 2005~2006 年均显著低于上一年度。2005~2006 年的累进吸收百分率在拔节期和孕穗期显著高于上一年度,其他时期差异不显著。冬前、开花和成熟期的平均累进吸收百分率,分别约为 12%、80%和 100%。

2.2.2 锰的阶段吸收量和日吸收量 2 年中小麦对锰的阶段吸收量最高的阶段,都在起身至拔节、拔节至孕穗或孕穗至开花期,冬前阶段的吸收量也较高。如果按生育前期(出苗至起身)、中期(起身至开花)和后期(开花至成熟)3 个阶段划分,则以生育中期的阶段吸收量最高,前期次之,后期最小(表 6)。不同品种比较,2004~2005 年 JF703 和 SX828 全生育期各阶段对锰的吸收较均匀,SM14 和 SM12 则在拔节至开花期间有明显的吸收高峰,其他时期吸收量较小,特别是开花 10 d 后基本不吸收或为负值。2005~2006 年的 4 个品种在不同生育阶段的吸收量变化也各有特点。

表 6 还看出,小麦对锰的日吸收量的变化趋势与阶段吸收量的趋势类似,有冬前和生育中期 2 个峰值,以生育中期最高(部分品种持续到开花后 10 d),前期次之,后期最小。不同品种之间日吸收量的差异,也与不同品种之间阶段吸收量的差异类似。

表2 小麦各器官总干物质中的含锰量(mg/kg)

Table 2 Mn concentrations in dry matter of various organs of wheat

年份 Year	器官 Organs	品种 Cultivars	冬前期 Pre-winter	起身期 Double ridge	拔节期 Jionting	孕穗期 Booting	开花后天数 Days after anthesis(d) 0	10	20	成熟期 Maturity
2004～2005	叶片 Leaf blade	SM14	108.0 a	115.0 b	82.5 b	77.5 b	83.5 a	85.5 a	89.5 a	87.5 a
		SM12	107.0 a	117.5 b	76.0 b	74.5 b	73.0 b	77.0 b	78.5 b	86.0 a
		JF703	89.0 b	119.3 b	88.7 b	72.3 b	73.0 b	72.3 b	77.0 b	76.0 b
		SX828	101.0 a	137.7 a	95.3 a	84.0 a	84.7 a	89.3 a	94.3 a	92.0 a
	叶鞘 Leaf sheath	SM14	83.5 a	103.5 b	72.5 b	64.0 ab	63.0 ab	63.0 a	59.5 a	60.5 a
		SM12	90.5 a	110.0 b	74.5 b	58.5 b	58.5 b	64.5 a	59.5 a	60.5 a
		JF703	76.7 b	103.3 b	77.3 b	59.0 b	58.7 b	59.3 a	60.0 a	57.7 a
		SX828	96.7 a	127.0 a	89.7 a	67.0 a	69.3 a	67.3 a	62.7 a	65.7 a
	茎秆 Stem	SM14			66.5 b	58.5 b	59.0 a	55.5 a	48.0 a	47.5 a
		SM12			64.0 b	58.0 b	58.6 a	56.0 a	50.5 a	49.0 a
		JF703			72.0 ab	59.7 b	60.7 a	56.3 a	49.3 a	48.7 a
		SX828			80.3 a	67.3 a	66.0 a	58.3 a	50.7 a	49.0 a
	穗部 Spike	SM14				48.5 a	55.0 a	59.0 a	61.0 a	63.5 a
		SM12				48.0 a	54.0 a	60.0 a	59.5 a	55.5 ab
		JF703				50.0 a	52.7 a	54.0 b	56.0 a	53.0 b
		SX828				48.3 a	55.3 a	62.3 a	60.7 a	56.3 ab
	子粒 Grain	SM14						77.5 a	67.5 a	54.5 ab
		SM12						75.0 a	68.5 a	51.0 b
		JF703						69.0 b	68.0 a	61.7 a
		SX828						75.3 a	74.7 a	62.0 a
2005～2006	叶片 Leaf blade	TM1	59.5 b	58.5 c	73.0 b	79.0 b	98.0 a	111.5 a	108.5 a	94.5 a
		SM12	64.0 b	67.0 b	70.3 b	82.0 b	87.5 b	91.5 b	86.5 c	89.0 a
		SX531	73.0 a	81.5 a	84.5 a	90.5 a	97.5 a	109.5 a	95.5 b	90.0 a
		SX828	63.5 b	81.0 a	86.5 a	90.5 a	97.0 a	92.5 b	87.0 c	86.5 a
	叶鞘 Leaf sheath	TM1	41.5 b	64.5 b	64.0 b	51.0 b	50.0 a	46.0 a	36.5 b	32.5 b
		SM12	51.5 a	60.5 b	54.0 c	53.5 b	48.5 a	44.5 a	45.0 ab	32.5 b
		SX531	53.0 a	77.5 a	76.0 a	62.0 a	51.0 a	44.5 a	44.0 ab	44.5 a
		SX828	47.0 ab	67.5 ab	74.0 a	43.5 c	45.0 a	40.5 a	51.0 a	39.5 ab
	茎秆 Stem	TM1			60.5 a	39.0 b	35.5 b	29.0 a	15.0 a	12.5 a
		SM12			54.5 b	38.5 b	32.0 b	27.0 a	16.5 a	11.5 a
		SX531			52.0 b	35.5 b	34.5 b	30.0 a	17.5 a	15.0 a
		SX828			64.5 a	56.5 a	46.5 a	26.0 b	18.8 a	13.5 a
	穗部 Spike	TM1				15.5 a	29.0 a	34.5 b	41.5 b	48.5 b
		SM12				17.5 a	30.0 a	34.0 b	40.5 b	39.0 c
		SX531				20.5 a	31.5 a	41.5 a	50.5 a	61.5 a
		SX828				21.0 a	36.0 a	44.0 a	48.5 a	59.0 a
	子粒 Grain	TM1						74.0 b	64.5 a	46.5 a
		SM12						92.0 a	70.0 a	52.5 a
		SX531						99.0 a	66.0 a	54.5 a
		SX828						96.5 a	60.0 a	50.5 a

注(Note)：数值后不同小写字母表示每个年度品种间差异达5%显著水平 Values followed by different letters among the four cultivars in each growing year means significant at 5% level.

表 3　不同生育时期锰在地上部器官中的积累量(g/hm^2)

Table 3　Accumulation amounts of Mn in above-ground organs at various growth stages

年份 Years	器官 Organs	品种 Cultivars	冬前期 Pre-winter	起身期 Double ridge	拔节期 Jionting	孕穗期 Booting	开花后天数 Days after anthesis(d) 0	10	20	成熟期 Maturity
2004～2005	叶片 Leaf blade	SM14	59.5 b	96.0 b	186.0 b	325.5 ab	319.5 a	395.3 a	252.5 a	280.0 a
		SM12	83.5 ab	82.5 b	181.5 b	282.0 b	361.1 a	407.2 a	270.0 a	224.0 a
		JF703	101.5 a	244.5 a	280.5 a	381.5 a	358.0 a	366.1 a	261.0 a	228.5 a
		SX828	103.5 a	267.0 a	289.5 a	324.5 ab	304.5 a	379.2 a	283.5 a	253.5 a
	叶鞘 Leaf sheath	SM14	47.4 a	82.5 ab	91.5 b	187.5 a	171.0 ab	150.2 a	126.0 a	116.9 a
		SM12	44.0 a	59.0 b	75.0 b	135.0 a	195.0 a	167.9 a	139.5 a	129.5 a
		JF703	64.5 a	107.0 a	116.6 a	142.0 a	153.0 b	163.7 a	160.1 a	140.5 a
		SX828	66.0 a	135.0 a	162.0 a	190.5 a	199.5 a	181.0 a	161.0 a	149.6 a
	茎秆 Stem	SM14			30.0 ab	160.5 a	310.5 a	283.2 a	238.1 a	211.5 a
		SM12			25.5 b	107.6 b	351.5 a	290.3 a	332.0 a	217.5 a
		JF703			22.5 b	128.0 ab	268.1 a	287.0 a	311.0 a	233.5 a
		SX828			35.6 a	135.5 ab	286.5 a	305.9 a	304.5 a	244.5 a
	穗部 Spike	SM14				15.0 a	126.5 a	140.1 a	150.0 a	140.5 a
		SM12				15.0 a	122.6 a	141.7 a	113.5 a	99.0 b
		JF703				19.0 a	108.0 a	124.6 a	142.5 a	132.5 a
		SX828				19.5 a	115.5 a	131.4 a	140.0 a	144.5 a
	子粒 Grain	SM14						111.5 a	303.0 a	494.3 ab
		SM12						119.8 a	224.7 a	453.0 b
		JF703						107.6 a	294.0 a	546.0 a
		SX828						102.6 a	288.5 a	554.5 a
2005～2006	叶片 Leaf blade	TM1	78.3 ab	83.4 b	252.4 a	382.2 a	392.1 a	521.7 a	367.4 a	303.6 a
		SM12	83.0 a	95.9 ab	223.3 a	348.8 ab	368.7 a	310.9 c	268.6 ab	208.3 b
		SX531	71.4 ab	94.7 ab	254.3 a	392.0 a	362.4 a	395.4 b	283.6 ab	155.3 b
		SX828	64.3 b	126.0 a	261.1 a	313.9 b	358.1 a	341.7 c	264.8 b	150.4 b
	叶鞘 Leaf sheath	TM1	37.2 a	68.6 a	128.6 a	187.3 a	214.6 a	117.6 a	105.1 a	80.6 a
		SM12	42.5 a	63.3 a	83.2 c	93.0 b	109.4 b	117.1 a	114.2 a	61.3 a
		SX531	36.7 a	62.5 a	113.8 a	151.9 ab	130.5 b	116.1 a	120.5 a	84.9 a
		SX828	30.4 a	54.2 a	93.3 b	143.9 ab	156.3 ab	107.2 a	102.5 a	76.9 a
	茎秆 Stem	TM1			30.5 a	105.2 a	180.3 a	127.3 a	84.2 a	56.5 a
		SM12			17.1 b	62.9 b	162.5 a	143.9 a	80.4 a	48.4 a
		SX531			19.6 b	65.2 b	160.9 a	146.9 a	83.4 a	53.3 a
		SX828			21.7 b	97.6 a	159.2 a	154.5 a	86.8 a	50.3 a
	穗部 Spike	TM1				5.4 b	67.7 a	65.5 b	104.8 b	125.1 a
		SM12				5.9 b	64.1 a	93.4 a	103.7 b	108.2 b
		SX531				7.1 ab	73.3 a	96.2 a	134.5 a	133.7 a
		SX828				13.6 a	62.8 a	110.1 a	106.5 b	128.6 a
	子粒 Grain	TM1						77.5 b	306.4 a	416.5 a
		SM12						86.2 b	319.0 a	436.6 a
		SX531						110.3 a	311.3 a	463.5 a
		SX828						150.7 a	276.4 a	426.4 a

注(Note)：不同小写字母表示每个年度品种间差异达 5% 显著水平 Different letters among the four cultivars in each growing year means significant at 5% level.

表4 不同生育时期锰在地上部器官中的分配率(%)

Table 4 Distribution percentages of Mn in above-ground organs at various growth stages

年份 Years	器官 Organs	品种 Cultivars	冬前期 Pre-winter	起身期 Double ridge	拔节期 Jionting	孕穗期 Booting	开花后天数 Days after anthesis(d) 0	10	20	成熟期 Maturity
2004～2005	叶片 Leaf blade	SM14	57.0 b	54.1 b	60.5 a	47.6 a	34.5 a	36.5 a	23.6 a	23.5 a
		SM12	65.4 a	58.9 b	63.9 a	52.3 a	35.0 a	36.1 a	25.3 a	19.9 a
		JF703	61.3 a	69.6 a	67.5 a	53.0 a	34.9 a	34.9 a	22.1 a	17.7 a
		SX828	61.0 a	66.5 a	59.1 a	48.6 a	33.6 a	34.5 a	24.0 a	20.3 a
	叶鞘 Leaf sheath	SM14	43.0 a	45.9 a	29.8 a	27.0 a	18.4 b	13.9 a	11.8 a	9.8 a
		SM12	34.6 a	41.1 a	27.0 a	25.0 a	18.9 b	14.9 a	12.9 a	11.5 a
		JF703	38.7 a	30.4 b	27.3 a	16.6 b	18.8 b	15.6 a	13.9 a	11.0 a
		SX828	39.0 a	33.5 b	33.5 a	28.4 a	22.0 a	16.4 a	13.1 a	10.8 a
	茎秆 Stem	SM14			9.7 a	23.3 a	33.4 a	26.3 a	22.1 b	16.3 a
		SM12			9.1 a	19.9 ab	34.2 a	25.8 a	30.5 a	19.4 a
		JF703			5.2 b	17.8 b	33.0 a	27.4 a	26.7 ab	18.3 a
		SX828			7.4 b	20.2 ab	31.6 a	27.9 a	26.2 ab	17.6 a
	穗部 Spike	SM14				2.1 a	13.7 a	13.0 a	14.0 a	12.3 a
		SM12				2.7 a	11.9 a	12.6 a	10.6 b	8.8 a
		JF703				2.6 a	13.3 a	11.9 a	12.2 b	10.3 a
		SX828				2.9 a	12.7 a	11.9 a	12.1 b	10.4 a
	子粒 Grain	SM14						10.3 a	28.5 a	38.1 a
		SM12						10.6 a	20.7 b	40.4 a
		JF703						10.2 a	25.1 ab	42.7 a
		SX828						9.3 a	24.5 ab	40.9 a
2005～2006	叶片 Leaf blade	TM1	67.9 a	54.6 c	61.5 a	56.3 ab	45.7 b	57.2 a	38.2 a	31.1 a
		SM12	66.7 a	60.5 b	69.0 a	68.7 a	52.7 a	41.6 bc	30.0 a	24.2 ab
		SX531	65.9 a	60.2 b	65.6 a	63.5 a	49.7 ab	45.8 b	31.3 a	22.6 ab
		SX828	67.9 a	69.9 a	69.4 a	53.6 b	49.3 ab	39.5 c	31.6 a	17.4 b
	叶鞘 Leaf sheath	TM1	32.2 a	45.5 a	31.2 a	27.5 a	25.7 a	12.9 a	10.8 a	8.2 a
		SM12	33.3 a	39.5 b	25.8 b	18.0 b	15.1 c	15.6 a	13.0 a	7.1 a
		SX531	34.1 a	39.8 b	29.5 ab	24.8 a	17.9 b	13.4 a	13.6 a	9.5 a
		SX828	32.1 a	30.1 c	24.8 b	24.5 ab	21.5 ab	12.4 a	12.2 a	8.9 a
	茎秆 Stem	TM1			7.4 a	15.4 b	20.8 a	14.2 b	8.7 a	5.8 a
		SM12			5.3 b	12.3 c	23.3 a	19.1 a	9.0 a	5.7 a
		SX531			5.1 b	10.6 c	22.0 a	17.3 ab	8.7 a	6.0 a
		SX828			5.8 b	20.1 a	20.7 a	17.9 ab	10.4 a	5.8 a
	穗部 Spike	TM1				0.8 b	7.9 a	7.2 b	10.8 b	12.8 a
		SM12				1.2 ab	9.0 a	12.8 a	11.8 ab	12.6 a
		SX531				1.2 ab	10.5 a	11.1 a	14.1 a	15.1 a
		SX828				1.8 a	8.4 a	12.8 a	12.7 ab	14.9 a
	子粒 Grain	TM1						8.5 b	31.5 a	42.3 b
		SM12						10.9 b	36.2 a	50.6 a
		SX531						12.6 ab	32.4 a	52.1 a
		SX828						17.4 a	33.0 a	47.8 ab

注(Note): 数值后不同小写字母表示每个年度品种间差异达5%显著水平 Values followed by different letters among the four cultivars in each growing year means significant at 5% level.

表5　小麦植株锰的总积累量和累进吸收百分率

Table 5　The accumulation amounts and accumulative percentages of Mn in wheat plants

年份 Years	品种 Cultivars	项目 Parameters	冬前期 Pre-winter	起身期 Double ridge	拔节期 Jionting	孕穗期 Booting	开花后天数 Days after anthesis(d) 0	10	20	成熟期 Maturity
2004	SM14	A	107.2 b	178.2 b	307.6 b	689.2 a	926.1 a	1080.4 a	1069.8 b	1193.4 b
~		P	9.4 a	15.7 b	27.1 a	60.8 a	81.5 ab	95.2 a	94.1 a	94.4 a
2005	SM12	A	127.6 ab	141.2 b	282.2 b	538.8 b	1029.5 a	1126.9 a	1109.6 ab	1120.1 b
		P	11.3 a	12.5 b	25.0 a	47.8 a	91.3 a	99.9 a	98.4 a	94.8 a
	JF703	A	166.4 a	350.9 a	452.9 a	668.0 a	883.5 a	1049.0 a	1167.9 ab	1278.3 ab
		P	13.7 a	29.0 a	37.4 a	54.6 a	72.1 b	86.1 b	94.9 a	99.5 a
	SX828	A	169.3 a	401.7 a	487.9 a	669.9 a	904.4 a	1100.0 a	1169.9 a	1350.0 a
		P	13.0 a	30.8 a	37.3 a	51.5 a	69.0 b	84.2 b	86.7 a	100.0 a
	平均	A	142.7 a	268.0 a	382.6 a	641.4 a	935.9 a	1089.0 a	1194.3 a	1235.5 a
	Mean	P	11.8 a	22.0 a	31.7 b	53.7 b	78.5 a	91.3 a	96.0 a	97.2 a
2005	TM1	A	115.3 ab	151.9 a	361.4 ab	679.9 a	858.6 a	912.2 a	967.9 a	982.2 a
~		P	11.7 a	15.5 a	36.6 b	69.4 a	87.2 a	93.8 a	98.5 a	100.0 a
2006	SM12	A	125.4 a	159.1 a	323.5 b	510.4 b	704.1 b	766.4 b	885.8 ab	862.6 b
		P	14.0 a	17.8 a	35.9 b	56.7 a	78.1 a	85.0 b	98.5 a	96.1 a
	SX531	A	108.0 ab	157.0 a	387.5 a	616.0 ab	729.2 b	866.0 ab	906.1 ab	890.5 b
		P	11.9 a	17.3 a	42.7 a	67.9 a	80.4 a	95.4 a	99.8 a	98.0 a
	SX828	A	94.6 b	180.2 a	376.0 a	585.7 ab	728.1 b	865.5 ab	836.9 b	862.5 b
		P	10.9 a	20.8 a	43.5 a	67.7 a	84.1 a	100.0 a	96.7 a	99.6 a
	平均	A	110.9 b	162.1 b	374.2 a	598.1 a	755.2 b	852.5 b	899.2 b	899.4 b
	Mean	P	12.1 a	17.9 a	39.7 a	65.4 a	82.4 a	93.6 a	98.4 a	98.4 a

注(Note):A—总吸收量 Accumulation amount (g/hm^2);P—累进吸收百分率 Accumulative percentage (%).数值后不同字母表示每个年度4个品种间A或P的差异达5%显著水平 Values followed by different letters of the A or P among four cultivars in each growing year means significant at 5% level.

表6　不同品种锰的阶段吸收量和日吸收量

Table 6　Phasic and daily absorption amounts of Mn of different cultivars

项目 Parameters	年份 Years	品种 Cultivars	出苗—越冬 Pre-winter	越冬—起身 Prewinter to double ridge	起身—拔节 Double ridge to jionting	拔节—孕穗 Jionting to booting	孕穗—开花 Booting to anthesis	0—10 DAA	10—20 DAA	20DAA—成熟 20DAA to maturity
阶段	2004	SM14	107.2 b	70.9 c	129.4 a	381.6 a	237.0 b	154.3 a	-10.6 b	123.6 a
吸收量	~	SM12	127.6 ab	13.6 c	141.1 a	256.5 ab	490.7 a	97.4 b	-57.2 b	50.5 b
Phasic	2005	JF703	166.4 a	184.5 b	102.0 ab	215.1 ab	215.5 b	165.5 a	119.0 a	111.0 a
absorption		SX828	169.3 a	232.4 a	86.3 b	182.0 b	234.5 b	195.6 a	69.9 a	180.0 a
	2005	TM1	115.4 ab	36.5 b	209.5 ab	258.5 a	268.7 a	62.6 b	46.7 ab	14.3 b
	~	SM12	125.5 a	33.6 b	164.4 b	186.9 b	194.2 b	61.8 b	119.4 a	-23.2 c
	2006	SX531	108.0 ab	49.1 b	230.5 a	228.5 ab	113.2 b	136.8 a	40.2 b	-15.6 c
		SX828	94.7 b	85.6 a	195.8 ab	209.6 ab	142.4 b	137.4 a	-28.6 b	25.6 a
日吸	2004	SM14	1.7 b	0.8 b	4.0 a	18.2 a	15.8 b	15.4 a	-1.1 b	12.2 ab
收量	~	SM12	2.0 ab	0.2 b	4.4 a	12.2 ab	32.7 a	9.7 b	-5.7 b	3.4 b
Daily	2005	JF703	2.6 a	2.2 a	3.2 a	10.2 ab	14.4 b	16.6 a	11.9 a	7.4 a
absorption	2005	SX828	2.7 a	2.7 a	2.7 a	8.7 b	15.6 b	19.6 a	17.0 a	12.6 a
	~	TM1	2.3 ab	0.4 b	7.5 ab	9.9 a	14.9 a	6.3b	4.7 ab	1.0 b
	2006	SM12	2.5 a	0.4 b	5.9 b	7.2 b	10.8 a	6.2 b	11.9 a	-1.5 c
		SX531	2.1 ac	0.5 b	8.2 a	8.8 ab	6.3 b	13.7 a	4.0 b	-1.0 c
		SX828	1.9 c	0.9 a	7.0 ab	8.1 ab	7.9 ab	13.7 a	-2.9 b	1.7 a

注(Note):A—总吸收量 Accum. amount (g/hm^2);P—累进吸收百分率 Accum. percentage (%);DAA—开花后天数 Days after anthesis.数值后不同字母表示每个年度4个品种间A或P的差异达5%显著水平 Values followed by different letters of the A or P among four cultivars in each growing year means significant at 5% level.

3 讨论

3.1 小麦植株中锰的含量和积累量及其影响因素

小麦植株中锰的含量和吸收积累量，关系到锰肥施用量的确定。一般认为，植物体内的含锰量约在 10～150 mg/kg[10]，但不同作物和生长条件下相差很大。小麦子粒含锰临界值为 15.5 mg/kg[12]。杨建堂等[7]研究表明，小麦植株的含锰量为 27.8～124.3 mg/kg。本研究表明，各生育时期不同器官的含锰量为 11.5～137.7 mg/kg(干重)，也在一般植物体含锰量的范围[10]，与前人[7-8,12]结果基本一致。

杨建堂等[7]在 7995 kg/hm^2 产量水平下测得小麦对锰的总积累量为 603.6 g/hm^2，平均每生产 100 kg 子粒吸收锰 7.5 g；张国印等[8]在 4.5 t/hm^2 产量水平测得小麦对锰的总积累量为 603.5 g/hm^2，每生产 100 kg 子粒吸收锰 13.4 g。本研究结果为，9000 kg/hm^2 左右产量的冬小麦锰的总积累量为 865.5～1350.0 g/hm^2，平均每生产 100 kg 子粒吸收 9.6～14.4 g。锰的总积累量高于上述研究结果[7-8]，而 100 kg 子粒产量的锰吸收量也高于杨建堂等[7]的结论，但与张国印等的结果相似[8]。在 2 个年度研究中，SX828 和 SM12 2 个品种相同，2005 年 SX828 子粒产量高于 2006 年，其锰积累量也高于 2006 年；而 2006 年的 SM12 产量略高于 2005 年，锰积累量却低于 2005 年。结合本研究与前人研究结果可以认为，在产量水平相差较大的情况下，小麦对锰的积累量随产量水平提高呈增加趋势；而在产量水平相近时，锰的积累量与产量水平的关系不大。这种趋势与不同产量水平冬小麦对硫[13]的吸收规律相似。

从本研究结果可以看出，小麦植株中锰的含量和积累量与气候因素有关。SM12 在地力相同、产量相当条件下，2005 年起身期、拔节期、抽穗期的日平均气温分别为 13.7℃、17.5℃和 19.4℃，而 2006 年相应生育时期平均气温为 12.1℃、13.9℃和 19.2℃，2005 年这些时期各器官(特别是非叶器官)的含锰量明显高于 2006 年，锰积累量(1235.5 g/hm^2)也高于 2006 年(899.4 g/hm^2)。可见，小麦植株中锰的含量和积累量与快速吸收阶段的气温有关。因为低温条件下小麦根系活化和吸收锰的能力降低[1,14]，而温度对小麦锰吸收的影响一般体现在非叶器官(尤其是茎秆)上。

本研究还表明，不同品种对锰的积累量也有差异。如 2005 年 SM12 与 JF703 产量相当，但 SM12 的锰积累量为 1126.9 g/hm^2，比 JF703(1278.3 g/hm^2)低 151.4 g/hm^2。这是由于不同品种根系活化溶解锰的能力不同所造成的[5]。因此，选用吸收利用锰能力强的小麦品种，对充分利用土壤有效锰可能有重要作用。刘学军等[15]研究指出，通过施锰满足锰的需求后，小麦品种间锰吸收的差异会大大缩小。因此，本研究的结果可说明，土壤有效锰含量对一些品种供应不足。JF703 和 SM12 属于同一类型的品种，但从产量构成因素看，JF703 的千粒重远高于 SM12，缺锰可能是造成 SM12 千粒重低的原因之一[16]。

3.2 超高产冬小麦需锰的关键时期与施肥

锰是作物必需的微量元素。土壤中的二价锰是植物能直接吸收利用的主要形态，但我国北方石灰性土壤中的二价锰很容易被氧化为高价锰[17]，使其有效性降低。随着产量提高、有机肥减少及化肥用量增加，土壤中的二价锰更多地被氧化成高价锰[18]，引起作物缺锰。河北省土壤有效锰的平均含量为 5.8 mg/kg，低于全国平均值[19]。本研究中土壤有效锰含量为 5.2～8.1 mg/kg，接近有效锰临界浓度(DTPA-Mn < 5 mg/kg[10])。对比本研究与有关研究[7-8]可见，随着产量水平提高，小麦对锰的吸收呈增加趋势，对土壤有效锰的临界水平可能也有更高要求。要稳定提高小麦产量，确定适宜的锰肥施用技术显得更为重要。

从本研究结果看出，生育期间小麦对锰的日吸收量为双峰曲线，第 1 个峰在冬前，峰值较低；第 2 个峰在起身到开花期，甚至延续到灌浆初期。此结果与张国印等[8]的结果相似，但与杨建堂等[7]的结果不尽相同，他们得到的第 1 个吸收峰在返青至拔节期，第 2 个在开花至乳熟期。本研究第 1 个峰值出现在冬前的可能原因是本研究的土壤中，有效氮、磷、钾含量比杨建堂等[7]研究的土壤高近 1 倍，而锰的吸收量与氮、磷、钾的变化趋势基本一致[20]，尤其在苗期表现突出。另外，冬前阶段也是冬小麦分蘖的第 1 个高峰期，吸收较多锰具有促蘖壮苗的作用[21]，所以冬前阶段是小麦吸收锰的重要时期之一[8]。因此，应通过播种前施用锰肥(浸种或拌种)，促进锰的吸收和苗期的正常生长。本研究及以往研究中关于小麦第 2 个锰吸收峰的时期相似，说明从起身拔节到开花乃至灌浆初期是小麦需锰的关键时期，除了早期施肥时充分考虑中后期需要以外，还应该采取中后期叶面喷施等措施[20]，保证这一阶段锰的供应。在本研究的超高产条件下，小麦对锰的总积累量为 865.5～1350.0 g/hm^2，相当于硫酸锰($MnSO_4$)3.15～4.92 kg/hm^2，可以作为确定超高产小麦

锰肥总施用量的参考依据之一。

参 考 文 献:

[1] 涂仕华,冯文强. 锰对小麦生长的影响及与其它元素的交互作用[J]. 西南农业学报,1999,12(土肥专辑):13-20.
Tu S H, Feng W Q. Effect of Mn on wheat growth and interactions between Mn and some other plant nutrients [J]. Southwest China J. Agric. Sci., 1999, 12 (Spec. Iss. Soil & Fert.): 13-20.

[2] 安振锋,方正. 植物锰营养研究进展[J]. 河北农业科学,2002,6(4):35-41.
An Z F, Fang Z. The advance of manganese nutrition in plant [J]. J. Hebei Agric. Sci., 2002, 6(4): 35-41.

[3] 钱晓晴,王娟娟,周明耀,等. 不同水、氮供应条件下水稻锰素营养状况研究[J]. 作物学报,2006,32(11):1689-1694.
Qian X Q, Wang J J, Zhou M Y *et al*. Characteristics of manganese nutrition of rice (*Oryza sativa* L.) cultivated under different water and nitrogen management conditions [J]. Acta Agron. Sin., 2006, 32 (11): 1689-1694.

[4] Shenker M, Plessner O E, Tel-Or E. Manganese nutrition effects on tomato growth, chlorophyll concentration, and superoxide dismutase activity [J]. J. Plant Physiol., 2004, 161: 197-202.

[5] 刘学军,吕世华,张福锁,毛达如. 施锰对不同基因型小麦锰营养与根际锰动态的影响[J]. 中国农业大学学报,1999,4(3):77-80.
Liu X J, Lü S H, Zhang F S, Mao D R. Effect of Mn fertilization on Mn nutrition and dynamics of available Mn in rhizosphere of two wheat genotypes [J]. J. China Agric. Univ., 1999, 4(3): 77-80.

[6] 石孝均,毛知耘,周则芳. 锌、锰与含氯氮肥配施对冬小麦子粒营养品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报,1997,3(2):160-168.
Shi X J, Mao Z Y, Zhou Z F. Effect of combined application of zinc, manganese and contain chlorine nitrogen fertilizer on nutrition quality of winter wheat grain [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1997, 3(2): 160-168.

[7] 杨建堂,王素芳,霍晓婷,等. 高产冬小麦锰素吸收、分配特点的研究[J]. 土壤通报,1998,29(1):39-41.
Yang J T, Wang S F, Huo X T *et al*. A study on the characteristics of Mn absorption, distribution in high-yielding winter wheat [J]. Chin. J. Soil Sci., 1998, 29(1): 39-41.

[8] 张国印,赵同科,孙祖琰. 锰锌的土壤吸附和小麦夏玉米对锰锌的吸收规律研究[J]. 河北农业科学,1998,2(2):21-25.
Zhang G Y, Zhao T K, Sun Z Y. Mn and Zn absorption by soil and patterns of Mn and Zn absorption by winter wheat and summer corn [J]. J. Hebei Agric. Sci., 1998, 2(2): 21-25.

[9] 于振文,潘庆民,董庆裕,田奇卓. 冬小麦超高产栽培[M]. 北京:中国农业出版社,1999. 1-15.
Yu Z W, Pan Q M, Dong Q Y, Tian Q Z. Winter wheat cultivation for super-high yield [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1999. 1-15.

[10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000. 278-279.
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000. 278-279.

[11] 吕英华,秦双月. 测土与施肥[M]. 北京:中国农业出版社,2002. 88-90.
Lü Y H, Qin S Y. Soil testing and fertilization [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2002. 88-90.

[12] 陈铭,尹崇仁. 锰,锌肥对冬小麦营养效应的研究[J]. 中国农业科学,1989,22(4):58-64.
Chen M, Yin C R. Study on nutritional effects of manganese and zinc fertilizers on winter wheat crops [J]. Sci. Agric. Sin., 1989, 22 (4): 58-64.

[13] 党红凯,李雁鸣,孙亚辉,等. 超高产冬小麦硫素营养特点的初步研究[J]. 麦类作物学报,2008,28(5):811-818.
Dang H K, Li Y M, Sun Y H *et al*. Preliminary study on the characteristics of sulfur nutrition in super high-yielding winter wheat [J]. J. Triticeae Crops, 2008, 28(5): 811-818.

[14] 何春娥,赵秀芬,刘学军,张福锁. 燕麦/小麦间作对小麦生长和锰营养的影响[J]. 生态学报,2006,26(2):357-363.
He C E, Zhao X F, Liu X J, Zhang F S. The effects of intercropping oat and wheat on growth and manganese nutrition of wheat [J]. Acta Ecol. Sin., 2006, 26(2): 357-363.

[15] 刘学军,曾祥忠,吕世华,张福锁. 施锰时期对不同基因型小麦锰营养及产量的影响[J]. 西南农业学报,2001,14(4):39-43.
Liu X J, Zeng X Z, Lü S H, Zhang F S. Effects of Mn application periods on Mn nutrition and grain yield of different wheat genotypes [J]. Southwest China J. Agric. Sci., 2001, 14(4): 39-43.

[16] 台萃,武泰存,王景安. 缺锰对不同基因型小麦生长的影响与机理[J]. 天津农业科学,2004,10(1):22-24.
Tai C, Wu T C, Wang J A. Mechanism and effect of manganese deficiency on growth of wheat genotypes [J]. Tianjin Agric. Sci., 2004, 10(1): 22-24

[17] Singh J P. Distribution and forms of copper, iron, manganese and zinc in calcareous soils of India [J]. Soil Sci. 1988, 146: 359-365.

[18] Guest C A, Schulze D G. Correlating manganese X-ray absorption near-edge structure spectra with extractable soil manganese [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2002, 66(4): 1172-1181.

[19] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京:中国农业出版社,1998. 950.
National Soil Survey Office. China soil [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1998. 950.

[20] 张会民,刘红霞,苗艳芳,等. 钾、锰配施对旱地冬小麦养分吸收与产量的影响[J]. 西北农业学报,2002,11(4):63-66.
Zhang H M, Liu H X, Miao Y F *et al*. Effect of potassium and manganese fertilizers cooperating application on nutrient uptake and yield of winter wheat in dryland [J]. Acta Agric. Bor. - Occid. Sin., 2002, 11(4): 63-66.

[21] 裴雪霞,党建友,王姣爱,等. 钾、锌、锰配施对冬小麦产量及品质的影响[J]. 麦类作物学报,2002,22(2):60-64.
Pei X X, Dang J Y, Wang J A *et al*. Effect of combined K, Zn, Mn fertilization on yield and quality of winter wheat [J]. J. Tritic. Crops, 2002, 22(2): 60-64.