植物营养与肥料学报 2015,21(1):72-80
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2015.0108

潮土小麦碳氮含量对长期不同施肥模式的响应

苗惠田[1,2], 吕家珑[1*], 张文菊[2], 徐明岗[2*], 黄绍敏[3], 张水清[3]

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100;
2 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,农业部作物营养与施肥重点开放实验室, 北京 100081;
3 河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所,河南郑州 450002)

摘要:【目的】以潮土21年长期定位试验为基础,分析不同施肥模式下冬小麦不同生育期的地上部生物量、碳氮含量、碳氮比及碳氮积累量,探讨冬小麦碳氮含量对不同施肥模式的响应规律。**【方法】**试验包括不施肥(CK)、单施氮肥(N)、施氮磷肥(NP)、施氮钾肥(NK)、氮磷钾配施(NPK)、氮磷钾肥配施有机肥(NPKM)、施氮磷钾肥及玉米秸秆还田(NPKS)7个处理。在2011～2012年冬小麦生长季,分别采集越冬、拔节、灌浆、成熟四个生育时期地上部植株样品,利用EuroVector EA3000型元素分析仪对小麦植株样品的全碳、全氮含量进行测定。**【结果】**NPK、NPKM和NPKS处理均能显著提高各生育期小麦地上部干重,其中NPKM处理小麦地上部干重在越冬、拔节、灌浆、成熟期分别比CK提高了111%、194%、238%、206%,除越冬期外,等量氮肥条件下,NPK、NPKM和NPKS 3个处理间小麦同一生育期地上部干重无显著差异,说明与氮磷钾配施相比,有机无机配施与秸秆还田这两种措施并不能显著提高小麦地上部生物量;小麦地上部碳含量受不同施肥影响很小,不同生育期小麦地上部碳含量平均值为410 g/kg;小麦成熟期地上部氮含量以N和NK处理最高,分别达到19.4和18.1 g/kg,其中N处理小麦地上部氮含量分别比NPKM和NPKS处理高52%和66%。随着生育期的推移,各处理小麦氮含量逐渐降低,总体表现为越冬期>拔节期>灌浆期≥成熟期;在整个生育期中各施肥处理碳含量基本保持不变而氮含量呈逐渐下降趋势,这就使得各施肥处理地上部分C/N比随生育期的推移呈逐渐增加趋势;不同施肥下小麦碳积累量差异性和地上部干物质重差异性规律一致,而不同施肥下地上部氮积累量差异性不同于干物质重的差异性,以NP处理最高,达545 kg/hm^2,分别比NPKM和NPKS处理高61%和68%。**【结论】**施肥方式不能显著改变小麦碳含量但能影响氮含量,因此小麦生物量大小决定了其碳的积累量,相应地,C/N比大小则由氮含量决定。氮磷钾配施、有机无机配施及秸秆还田处理下,小麦具有较高的生物量从而具有较高的碳氮积累量,这有利于增加农田系统碳、氮积累,提升土壤碳、氮肥力。

关键词: 长期施肥; 小麦; 碳含量; 氮含量; 碳氮比

中图分类号: S152.062 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2015)01-0072-09

Response of carbon and nitrogen contents of winter wheat to long-term fertilization treatments in fluvo-aquic soil

MIAO Hui-tian[1,2], LÜ Jia-long[1*], ZHANG Wen-ju[2], XU Ming-gang[2*], HUANG Shao-min[3], ZHANG Shui-qing[3]

(*1 College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;*
2 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Crop Nutrition and Fertilization, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China;
3 Institute of Plant Nutrition and Resources and Environment, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China)

Abstract:【Objectives】 In order to reveal impact of various fertilization treatments on carbon and nitrogen accumulation in wheat, we analyzed biomass carbon and nitrogen contents at different growth stages of wheat after 21-year of continuous fertilization management at a Zhengzhou experimental site. **【Methods】** The fertilization

收稿日期: 2014-06-18 **接受日期:** 2014-10-16

基金项目: 国家自然科学基金(41171239, 41371247);公益性行业(农业)科研专项(201203030);中央级公益性科研院所专项资金资助项目(IARRP-2014-28)资助。

作者简介: 苗惠田(1985—),男,青海西宁人,博士研究生,主要从事土壤碳氮循环方面的研究。E-mail: huitian_miao@aliyun.com

* 通信作者 E-mail: ljlll@nwsuaf.edu.cn; E-mail: xuminggang@caas.cn

treatments included non-fertilization (CK), chemical nitrogen (N), chemical nitrogen and phosphorus (NP), chemical nitrogen and potassium (NK), chemical nitrogen, phosphorus and potassium (NPK), NPK plus organic manure (NPKM), and NPK plus maize stalk (NPKS). The aboveground samples of three quadrats from each plot were randomly collected at the wintering stage, jointing stage, grain filling stage and maturity stage in 2011-2012 winter wheat growing season. The carbon and nitrogen contents of aboveground plant tissue were measured by EuroVector EA3000 Elemental Analyzer. 【**Results**】The results show that the above-ground biomass amounts of winter wheat can be improved efficiently under the NPK, NPKM and NPKS treatments, and the amounts at the wintering stage, jointing stage, grain filling stage and maturity stage in the NPKM treatment are 111%, 194%, 238% and 206% higher than those of the CK treatment, respectively. Except the wintering stage, the above-ground biomass amounts at same growth stage are not significantly different among the NPK, NPKM and NPKS treatments, which indicate that compared to the NPK treatment, NPKM and NPKS treatments do not effectively enhance above-ground biomass of winter wheat. The fertilization does not effectively affect the carbon content of aboveground plant tissue. The average of carbon content at the four growth stages is 410 g/kg. The nitrogen contents at the maturity stage of wheat are high under the N (19.4 g/kg) and NK (18.1 g/kg) treatments. The nitrogen content at the maturity stage of wheat under the N treatment is 52% higher than that under the NPKM treatment and 66% higher than that under the NPKS treatment. At different growth stages, the nitrogen contents of aboveground plant tissue are in sequence of wintering stage > jointing stage > grain filling stage ≥ maturity stage. With wheat growth, the carbon content is unchanged while the nitrogen content is decreased gradually, thus C/N ratio of wheat is increased gradually in each treatment. Carbon accumulations in above-ground are affected by above-ground biomass. The nitrogen accumulation amount at the maturity stage of wheat under the NP treatment is significantly higher than those under other treatments, and is about 545 kg/ha. 【**Conclusions**】The fertilization does not affect the carbon content of wheat, while the fertilization can affect the nitrogen content. Therefore, wheat biomass yield determines the carbon accumulation amount, and the nitrogen content determines C/N ratio. The NPK, NPKM and NPKS treatments significantly enhance the carbon and nitrogen accumulation amounts, thus these treatments are beneficial to enhance carbon and nitrogen accumulation in farmland system and improve soil fertility.

Key words: long-term fertilization; wheat; carbon content; nitrogen content; C/N ratio

碳、氮代谢相互制约、相互促进[1],是作物内部最基本的代谢方式,同时也是保障作物正常生长发育的物质基础,在很大程度上决定了作物产量的高低[2]。作物碳、氮含量及碳、氮比是反映作物体内碳、氮代谢相对强弱状况的指标。Osaki 等[3]认为过量的氮素运移会导致作物地上部分的叶片光合能力下降,阻碍光合作用,从而有可能影响到碳、氮向作物正在发育的籽粒中的正常输送,降低氮肥利用率,不利于作物产量提升[4]。随着氮肥投入水平的提高,作物的氮素运转率会随之增加,进而增加氮吸收量,提高作物氮含量[5-7]。Kuzyakov 和 Domanski[8]研究发现,施用高量氮肥会使作物光合碳向地下土壤碳库的转运量减少,而且过量氮的投入会导致作物生长量下降,不但增加成本而且会对环境造成污染。施磷能够促进植物体内硝态氮、铵态氮的同化,增强根系吸氮能力,有助于氮素的同化积累[9]。吴明才等[10]研究显示,植物体内蛋白质的合成需要光合作用同化的碳作为主要组分,而适当的施磷有助于植物蛋白质的积累,从而间接影响作物碳代谢。邹铁祥等[11]研究认为,施钾会显著促进小麦植株氮积累以及贮存氮的转运。齐华等[12]研究显示,施钾有助于提高作物叶片的光合速率,进而影响作物碳代谢。通过前人的研究结果不难看出,施肥能够影响作物的碳氮积累代谢进而影响作物的产量,且前人多以单一的氮、磷、钾肥输入对作物碳氮含量产生的影响进行研究,但对于不同氮、磷、钾肥配合施用以及氮、磷、钾肥配施有机物料等施肥模式对作物碳、氮含量及其积累是否有影响,以及作物碳、氮含量对不同施肥模式的响应是否一致,尚缺乏深入系统的研究。同时,以往有关农田生态系统碳氮循环的研究,多集中在土壤碳、氮累积以及农田 CO_2 排放等方面,且多在短期试验条件下进行,而长期施肥条件下作物碳氮积累数量及其特征,尤其是作物碳氮积累对不同施肥模式的响应特

征还鲜见报道。为此,本文以长期定位试验为基础,取样分析不同施肥下冬小麦不同生育期的地上部生物量、碳氮含量,以期阐明冬小麦碳氮积累对不同施肥的响应规律,为作物向土壤系统碳氮投入量的估算提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

试验点位于国家潮土肥力与肥料效益长期监测基地(北纬34°47′,东经113°40′)。该基地地处暖温带,年均气温14.4℃,年降雨量640.9 mm,无霜期约225 d,年日照时数2400 h,土壤为轻壤质潮土。试验始于1990年,试验开始时的耕层土壤主要性状为有机质10.2 g/kg、全氮0.65 g/kg、有效磷(P)7.7 mg/kg、速效钾(K)65 mg/kg、pH 8.3。种植制度为一年两熟小麦-玉米轮作。基地原址位于河南省郑州市,试验地于2009年5月采用原状土搬迁方式移至位于原址北部23 km处的河南省原阳县祝楼乡。

1.2 试验设计

本研究选择该长期试验的如下7个处理:1)CK(不施肥);2)N(单施氮肥);3)NP(施氮磷肥);4)NK(施氮钾肥);5)NPK(施氮磷钾肥);6)NPKM(氮磷钾化肥与有机肥配施,与NPK处理施氮量相同,其中70%的氮由有机肥提供);7)NPKS(施氮磷钾化肥并玉米秸秆还田,与NPK处理施氮量相同,2002年以前70%的氮由秸秆还田提供,根据秸秆含氮量确定用量,2003年开始只将该处理玉米秸秆还田,氮不足部分由尿素补充)。氮肥为尿素,磷肥为过磷酸钙,钾肥为氯化钾,有机肥为牛粪。氮、磷、钾肥配比为N∶P_2O_5∶K_2O=1∶0.5∶0.5,有机肥或秸秆带入土壤磷、钾的量[13]及具体施肥量见表1。试验用冬小麦品种为郑麦0856。小区面积45 m^2,重复3次。2012年耕层土壤主要性状见表2。

表1 不同施肥处理的小麦季肥料施用量(kg/hm^2)

Table 1 Annual application rates of fertilizers to wheat

处理 Treatment	来自无机肥的养分 Nutrients from fertilizers			来自有机肥的养分 Nutrients from manure		
	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O
CK	0	0	0	0	0	0
N	165	0	0	0	0	0
NP	165	82.5	0	0	0	0
NK	165	0	82.5	0	0	0
NPK	165	82.5	82.5	0	0	0
NPKM	50	82.5	82.5	115	176	113
NPKS	50	82.5	82.5	115	50	140

1.3 样品采集与测定

在2011~2012年冬小麦生长季,分别采集越冬、拔节、灌浆、成熟四个生育时期地上部植株样品。植株样品的采集采用样方的方法,每小区采集3个样方,样方面积为25 cm×25 cm。植株鲜样在105℃条件下杀青30 min,之后在70℃条件下烘干至恒重。烘干后对植株样品称重、粉碎,过0.25 mm筛备用。

利用EuroVector EA3000型元素分析仪,对小麦植株样品的全碳、全氮含量进行测定。

植株碳氮积累量采用如下公式计算:

碳积累量(C, kg/hm^2)=植株干物质量(kg/hm^2)×植株碳含量(C, g/kg)/1000

氮积累量(N, kg/hm^2)=植株干物质量(kg/hm^2)×植株氮含量(N, g/kg)/1000

1.4 数据处理

数据整理采用Microsoft Excel;绘图采用OriginPro 8.0;统计分析采用SPSS 17.0,显著性检验为LSD法($P \leqslant 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理各生育期小麦地上部生物量

不同施肥处理小麦地上部干重随生育期的延长而显著增加,在各生育期的差异规律基本一致(表3)。

表 2　2012 年不同施肥处理耕层土壤的主要性状

Table 2　Selected chemical properties of the soils from the experimental site under various long-term fertilization regimes(2012)

处理 Treatment	有机质 OM (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	有效磷 Avail. P (mg/kg)	速效钾 Avail. K (mg/kg)
CK	11.6	0.57	2.94	68.5
N	12.5	0.64	3.31	74.0
NP	13.9	0.71	13.40	63.8
NK	11.9	0.69	2.34	108.0
NPK	13.4	0.69	14.70	72.8
NPKM	17.6	0.89	33.50	113.0
NPKS	17.1	0.90	17.40	122.0

在同一生育期,与不施肥的对照(CK)相比,N 和 NK 处理没有显著提高小麦地上部干重,而 NP 处理则显著提高了小麦地上部干重,特别是在成熟期,NP 处理小麦地上部干重达到了 CK 处理的 3.5 倍(表 3),同时 NP 处理与 NPK 处理之间小麦地上部干重没有显著差异,说明在潮土上施钾对小麦的生长发育无明显作用。NPK、NPKM 和 NPKS 处理均能显著提高各生育期小麦地上部干重,其中 NPKM 处理小麦地上部干重在越冬、拔节、灌浆、成熟期分别比 CK 处理提高了 111%、194%、238%、206%。除越冬期外,等量氮肥条件下,NPK、NPKM 和 NPKS 3 个处理间小麦地上部干重在同一生育期无显著差异,说明与氮磷钾配施(NPK)相比,有机无机配施(NPKM)与化肥加秸秆还田(NPKS)这两种措施并不能显著提高小麦地上部生物量,同时也说明这两种措施对提高小麦生物量作用与施用化肥基本相当[14]。除了越冬期,N、NP、NK 3 个处理在同一生育期中,NP 处理的地上部干重显著高于单施氮肥处理,而 N 和 NK 处理间地上部干重无显著差异,说明该土壤磷素是限制其产量的重要因子之一。与单施氮肥和氮钾肥配施相比,氮肥和磷肥配施处理的增产效果明显。

表 3　不同生育期冬小麦地上部干物质量 (kg/hm^2)

Table 3　Above-ground biomass (dry basis) of winter wheat at different growth stages under various long-term fertilization regimes

处理 Treatment	越冬期 Wintering stage	拔节期 Jointing stage	灌浆期 Grain filling stage	成熟期 Maturity stage
CK	146 cD	1070 cC	4470 cB	9540 bA
N	124 cD	839 cC	4240 cB	9540 bA
NP	132 cD	2430 bC	9690 bB	33600 aA
NK	177 bcD	924 cC	6480 bcB	11700 bA
NPK	415 aD	3440 aC	15300 aB	31100 aA
NPKM	308 abD	3150 aC	15100 aB	29200 aA
NPKS	221 bcD	3200 aC	10600 abB	29900 aA

注(Note): 同列数字后不同小写字母表示同一生育期不同处理间差异显著 ($P \leq 0.05$) Different small letters in the same column mean significant differences between the treatments at the same stage ($P \leq 0.05$); 同行数字后不同大写字母表示同一处理不同生育期间差异显著 ($P \leq 0.05$) Different capital letters in the same row indicate significant differences among different stages for the same treatment ($P \leq 0.05$).

2.2　不同施肥处理小麦各生育期碳、氮含量

由表 4 可知,在同一生育期,不同施肥对小麦地上部碳含量影响差异很小,尤其是在成熟期,各施肥处理间小麦地上部碳含量无显著差异;但在不同生育期之间,由于地下部分各处理拔节期根系生物量迅速增加[15],碳主要向根系转运[16],因而小麦地上部碳含量总体表现为拔节期低于越冬、灌浆以及成熟期,其中 NPKM 处理成熟期地上碳含量比拔节期碳含量高 3%。

总体来看,小麦地上部碳含量受不同施肥处理影响很小,不同生育期小麦地上部碳含量平均值为 410 g/kg。

表 5 表明,与碳含量不同,长期不同施肥对不同生育期小麦地上部氮含量具有显著的影响。在成熟期,NPK 处理小麦地上部氮含量比 CK 处理高 37%,

表4 不同生育期冬小麦地上部碳含量(g/kg)

Table 4 Carbon content of above-ground biomass of winter wheat at different growth stages under various fertilizations

处理 Treatment	越冬期 Wintering stage	拔节期 Jointing stage	灌浆期 Grain filling stage	成熟期 Maturity stage
CK	421 abcA	398 bC	411 bcB	412 aB
N	425 abA	405 abB	411 bcB	410 aB
NP	423 abcA	415 aA	419 abA	417 aA
NK	415 cA	396 bB	414 abcA	411 aA
NPK	418 bcB	396 bC	421 aAB	418 aA
NPKM	426 aA	404 bB	420 aA	416 aA
NPKS	426 aA	399 bC	409 cBC	412 aB

注(Note):同列数字后不同小写字母表示同一生育期不同处理间差异显著($P \leqslant 0.05$) Different small letters in the same column mean significant differences between the treatments at the same stage ($P \leqslant 0.05$);同行数字后不同大写字母表示同一处理不同生育期间差异显著($P \leqslant 0.05$) Different capital letters in the same row indicate significant differences among different stages for the same treatment ($P \leqslant 0.05$).

表5 不同生育期冬小麦地上部氮含量(g/kg)

Table 5 Nitrogen content of above-ground biomass of winter wheat at different growth stages under various fertilizations

处理 Treatment	越冬期 Wintering stage	拔节期 Jointing stage	灌浆期 Grain filling stage	成熟期 Maturity stage
CK	39.1 bA	21.1 cB	13.2 dC	11.1 cC
N	34.5 cdA	30.1 abB	21.3 aC	19.4 aC
NP	43.7 aA	33.4 aB	18.7 abcC	16.1 bC
NK	33.6 dA	30.8 abA	19.1 abB	18.1 aB
NPK	38.1 bcA	29.7 bB	18.2 bcC	15.2 bD
NPKM	42.2 abA	30.2 abB	16.0 cdC	12.8 cC
NPKS	44.7 aA	27.9 bB	14.9 dC	11.7 cC

注(Note):同列数字后不同小写字母表示同一生育期不同处理间差异显著($P \leqslant 0.05$) Different small letters in the same column mean significant differences between the treatments at the same stage ($P \leqslant 0.05$);同行数字后不同大写字母表示同一处理不同生育期间差异显著($P \leqslant 0.05$) Different capital letters in the same row indicate significant differences among different stages for the same treatment ($P \leqslant 0.05$).

而与CK相比,NPKM和NPKS处理并未显著提高小麦地上部氮含量;N、NP和NK处理均显著高于CK处理。N和NK处理间小麦地上部氮含量无显著差异,分别为19.4 g/kg和18.1 g/kg,显著高于施用磷肥的处理。同时也能够看出,与单施氮肥相比,氮肥和钾肥配施对植株氮含量的提升效果明显优于氮肥和磷肥配施。随着生育期的推移,各处理小麦氮含量逐渐降低,总体表现为越冬期>拔节期>灌浆期≥成熟期。

2.3 不同施肥处理小麦各生育期碳氮比的变化

长期不同施肥下,不同生育期小麦C/N比是其体内碳氮代谢状况和氮素利用效率的综合反映。图1显示,在越冬期,不同施肥下小麦地上部C/N比差异不显著。而在成熟期,不同施肥处理地上部C/N比差异显著,不施肥处理地上部C/N比显著高于施肥处理;NPKM和NPKS处理间地上部C/N比无显著差异,NPK处理地上部C/N比显著低于NPKM和NPKS处理,说明施用有机肥以及秸秆还田可以有效提高植株C/N比;N、NP和NK处理地上部C/N比均显著低于NPK、NPKM和NPKS处理;与单施氮肥处理(N)相比,NK处理没有显著增加植株C/N比,而NP处理地上部C/N比相对于单施氮肥处理(N)提高了22%,可见,偏施氮肥可导致作物吸收较多氮,从而降低了碳氮比。对小麦地上部碳氮含量结果分析表明,在整个生育期中各施肥处理碳含量基本保持不变而氮含量呈逐渐下降趋

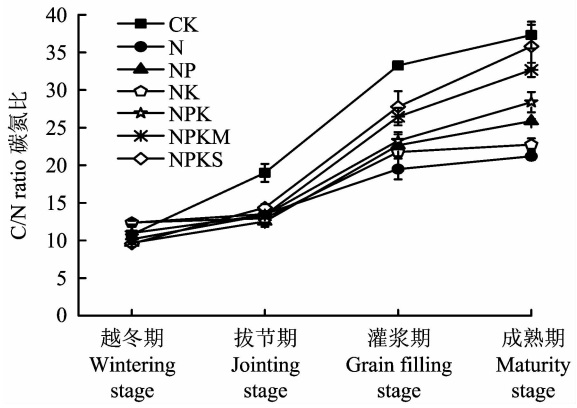

图 1　不同生育期冬小麦地上部碳氮比

Fig. 1　C/N ratio of above ground tissues of winter wheat at different growth stages under various fertilizations

势,这就使得各施肥处理地上部分 C/N 比随生育期的推移呈逐渐增加趋势,其中 NPKM 处理成熟期地上部分 C/N 比是越冬期的 3 倍。

2.4　不同施肥处理小麦成熟期碳、氮积累量

小麦碳、氮积累量是其生物产量和碳、氮含量的综合反映。小麦不同生育期碳氮积累量与生物量的变化趋势相似,这里仅列出了不同施肥下小麦成熟期的碳、氮积累量(图 2)。图 2 表明,NP、NPK、NPKM 和 NPKS 处理碳积累量均显著高于 CK、N 和 NK 处理。由此看出,不同施肥下小麦成熟期碳积累量差异性规律和同期小麦干物质重差异性规律完全一致,这主要是由于不同施肥处理小麦碳含量没有显著差异,使得碳积累量的变化规律完全由植株生物量决定。

与碳积累量不同,由于不同施肥下小麦氮含量差异显著,因此不同施肥处理间氮积累量差异性规律并不是完全由植株生物量决定。和对照相比,所有施肥处理成熟期氮累积量均有显著提高。其中,NP 处理显著高于其他处理。各处理成熟期地上部累积氮量依次为: NP > NPK > NPKM ≈ NPKS > NK > N > CK(图 2)。

3　讨论

本研究表明,氮磷钾配施(NPK)、有机无机配施(NPKM)及秸秆还田(NPKS)能显著提高小麦地上部生物量,这与目前许多长期试验结果一致[17-18]。在 CK、N、NP 和 NK 几个处理中,NP 处理成熟期生物量显著高于 CK、N 和 NK 处理,这主要是由于土壤有效磷(Olsen-P)含量在试验初期

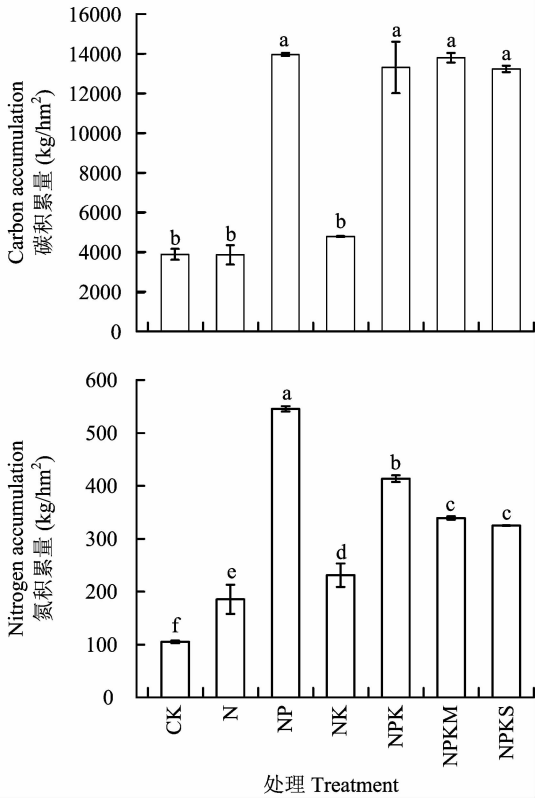

图 2　冬小麦成熟期碳、氮积累量

Fig. 2　Carbon and nitrogen accumulation amounts in above ground biomass of winter wheat at the maturity stage under various fertilizations

[注(Note): 方柱上不同小写字母表示不同处理间差异显著($P \leq 0.05$) Different small letters above the bars mean significant differences between treatments ($P \leq 0.05$).]

(1990 年)仅为 7.7 mg/kg,为缺磷土壤;并且长期不施磷肥,导致土壤养分供应与作物生长对养分需求之间不平衡关系加剧,因而严重影响了小麦的碳同化、氮吸收及其速率[19-20]。因此,合理施用磷肥有利于作物产量的提高,进而增加有机碳的归还量,这对提高并维持农田土壤有机碳意义重大[21-22]。

本研究表明,在同一生育期,长期不同施肥下的小麦地上部碳含量并未表现出显著差异,说明施肥对小麦碳含量产生的影响不显著[23-24]。尚辉等[25]研究表明,在同一器官不同施肥下作物的碳含量并没有表现出显著性差异,这同样说明施肥不能改变作物碳含量。与碳含量不同,长期不同施肥对不同生育期小麦地上部氮含量具有显著影响。单施氮肥处理(N)能够显著提高植株氮含量。杜红霞等[26]研究表明,施磷肥能够促进作物对氮的吸收,但是由于稀释效应的存在,氮含量会降低,这可能是导致施用磷肥(NP、NPK、NPKM 和 NPKS)处理小麦地上

部氮含量均显著低于不施磷肥(N、NK)处理的原因。NPKM、NPKS处理与NPK相比显著降低了小麦地上部氮含量,说明添加有机物料并不能有效提高作物氮含量,这可能是由于有机物料加入土壤后在分解过程中产生了小麦和土壤微生物之间争氮的矛盾,从而降低了小麦氮素吸收[27]。

由于小麦地上部氮含量在整个生育期呈现逐渐下降趋势,而碳含量基本保持不变,因此随着生育期的推移,各施肥处理地上部分C/N比呈逐渐增加趋势,这也反映出植株C/N比主要由氮含量决定。这就意味着氮肥的合理施用直接关系到植株的C/N比,进而关系到还田有机物的分解、有机质的周转以及农田土壤的碳固定[28]。由于长期缺乏氮素供应,CK处理地上部C/N比显著高于施肥处理,同时在缺氮条件下植株籽粒干物质积累也会受到限制,最终导致作物减产[29]。与单施氮肥(N)、氮钾肥配施(NK)处理相比,有机无机配施(NPKM)、化肥及秸秆还田(NPKS)这两个处理具有较高的小麦地上部C/N比。有研究表明,植株体内维持较高的碳氮比,会利于物质向籽粒转运[30],相反,N、NK处理较低的C/N比则会使植株叶片生长过盛,消耗过多的光合产物,不利于物质向籽粒转运,最终限制作物产量提升[31]。

由于成熟期不同施肥处理间小麦地上部碳含量没有显著差异,所以小麦地上部碳积累量的大小主要由生物量的大小决定,这就使得不同施肥处理间小麦成熟期碳积累量的差异性规律和不同施肥处理间小麦同期地上部干物质重的差异性规律一致。由此看来,小麦的生物量不仅可以影响植株的碳积累量,同时还是小麦固碳效力的决定因素[25]。与碳积累量不同,由于不同施肥处理间小麦氮含量存在显著差异,因此不同施肥处理间氮积累量差异性规律并不是完全由植株生物量决定的。由于氮磷钾配施(NPK)、有机无机配施(NPKM)和化肥及秸秆还田(NPKS)处理下小麦具有较高的生物量,因此这些施肥处理下小麦同样具有较高的碳氮积累量。而潘根兴等[32]研究表明,合理的施肥在有效促进作物产量及生物量增加的同时还能够增加有机碳的自然还田量,这就意味着这些施肥处理能够增加农田系统碳、氮投入,补充土壤养分消耗,从而有利于农田培肥[33-35]。

4 结论

长期施肥条件下,施肥方式不能改变小麦碳含量;小麦地上部氮含量对不同施肥的响应明显,单施氮肥处理能够有效提高小麦氮含量,施用磷肥减少了小麦氮含量,添加有机物料能够显著提高小麦生物量但并不能有效提高作物氮含量;小麦碳含量在整个生育期基本保持不变,因此小麦生物量大小决定了碳积累量的大小,相应地,C/N比大小则由氮含量决定,表明生物量是小麦固碳效力的决定因素。氮磷钾配施、有机无机配施及化肥加秸秆还田处理下小麦具有较高的生物量,从而具有较高的碳氮积累量,有利于增加农田系统碳、氮投入和提升土壤肥力。

参 考 文 献:

[1] 朱根海, 张荣铣. 叶片含氮量与光合作用[J]. 植物生理学通讯, 1985, (2): 9-12.
Zhu G H, Zhang R X. The relation between leaf nitrogen content and photosynthesis[J]. Plant Physiology Communications, 1985, (2): 9-12.

[2] 李潮海, 刘奎, 连艳鲜. 玉米碳氮代谢研究进展[J]. 河南农业大学学报, 2000, 34(4): 318-323.
Li C H, Liu K, Lian Y X. The recent progress of research on carbon and nitrogen metabolism in maize[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2000, 34 (4): 318-323.

[3] Osaki M, Iyoda M, Tadano T. Ontogenic changes in the contents of ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase oxygenase, phosphoenolpyruvate carboxylase and chlorophyll in individual leaves of maize[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1995, 41 (2): 285-293.

[4] 赵营, 同延安, 赵护兵. 不同供氮水平对夏玉米养分累积、转运及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(5): 622-627.
Zhao Y, Tong Y A, Zhao H B. Effects of different N rates on nutrients accumulation, transfer and yield of summer maize[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(5): 622-627.

[5] 李久生, 李蓓, 宿梅双,等. 冬小麦氮素吸收及产量对喷灌施肥均匀性的响应[J]. 中国农业科学, 2005, 38(8): 1600-1607.
Li J S, Li B, Su M S *et al*. Responses of nitrogen uptake and yield of winter wheat to uniformity of sprinkler fertigation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(8): 1600-1607.

[6] 张睿. 半湿润农田生态系统不同施肥处理对小麦子粒中氮、磷、钾含量和累积量的效应[J]. 西北植物学报, 2005, 25 (1): 150-154.
Zhang R. Effect of the different fertilizer treatments in the semi-moisten farm ecological system on the N, P and K elements content and accumulation in the kernel of winter wheat[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2005, 25(1): 150-154.

[7] 易镇邪, 王璞, 申丽霞,等. 不同类型氮肥对夏玉米氮素累积、转运与氮肥利用的影响[J]. 作物学报, 2006, 32 (5): 772-778.

Yi Z X, Wang P, Shen L X *et al*. Effects of different types of nitrogen fertilizer on nitrogen accumulation, translocation and nitrogen fertilizer utilization in summer maize [J]. Acta Agronomica Sinica, 2006, 32 (5): 772-778.

[8] Kuzyakov Y, Domanski G. Carbon input by plants into the soil. Review[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2000, 163 (4): 421-431.

[9] 毕远林. 大豆干物质积累与氮、磷、钾吸收与分配的研究[J]. 大豆科学, 1999, 18(4): 331-335.
Bi Y L. Study on accumulation of dry matter and absorption and distribution of nitrogen, phosphorous and potassium in soybean [J]. Soybean Science, 1999, 18 (4): 331-335.

[10] 吴明才, 肖昌珍, 郑普英. 大豆磷素营养研究[J]. 中国农业科学, 1999, 32(3): 59-65.
Wu M C, Xiao C Z, Zheng P Y. Study on the physilogical function of phosphorus to soybean [J]. Scientia Agricultura Sinica, 1999, 32(3): 59-65.

[11] 邹铁祥, 戴廷波, 姜东,等. 钾素水平对小麦氮素积累和运转及籽粒蛋白质形成的影响[J]. 中国农业科学, 2006, 39 (4): 686-692.
Zou T X, Dai T B, Jiang D *et al*. Potassium supply affected plant nitrogen accumulation and translocation and grain protein formation in winter wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(4): 686-692.

[12] 齐华, 于贵瑞, 程一松,等. 钾肥对灌浆期冬小麦群体内叶片光合特性的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(5): 690-694.
Qi H, Yu G R, Cheng Y S *et al*. Effect of potassium fertilization on the photosynthetic characteristics of the leaf of winter wheat population during its grain filling stage[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(5): 690-694.

[13] 黄绍敏, 宝德俊, 皇甫湘荣, 等. 长期定位施肥小麦的肥料利用率研究[J]. 麦类作物学报, 2006, 26(2): 121-126.
Huang S M, Bao D J, Huangpu X R *et al*. Long- term effect of fertilization on fertilizer use efficiency of wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2006, 26(2): 121-126.

[14] Zhang H M, Wang B R, Xu M G *et al*. Crop yield and soil responses to long-term fertilization on a red soil in Southern China [J]. Pedosphere, 2009, 19(2): 199-207.

[15] 邱喜阳, 王晨阳, 王彦丽,等. 施氮量对冬小麦根系生长分布及产量的影响[J]. 西北农业学报, 2012, 21(1): 53-58.
Qiu X Y, Wang C Y, Wang Y L *et al*. Effects of nitrogen application rate on root system distribution and grain yield of winter wheat cultivars[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2012, 21(1): 53-58.

[16] 金剑, 王光华, 刘晓冰,等. 作物生育期内光合碳在地下部的分配及转化[J]. 生态学杂志, 2008, 27(8): 1393-1399.
Jin J, Wang G H, Liu X B *et al*. Allocation and transformation of photosynthetic carbon in belowground part of crops during their growth period: A review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(8): 1393-1399.

[17] Zhang W J, Xu M G, Wang B R *et al*. Soil organic carbon, total nitrogen and grain yields under long-term fertilizations in the upland red soil of southern China [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2009, 84(1): 59-69.

[18] 张水清, 黄绍敏, 郭斗斗. 长期定位施肥对冬小麦产量及潮土土壤肥力的影响[J]. 华北农学报, 2010, 25(6): 217-220.
Zhang S Q, Huang S M, Guo D D. The effects of long-term fertilization on winter wheat yield and fertility of fluvo-aquic soil [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2010, 25 (6): 217-220.

[19] 吕家珑, 张一平, 王旭东,等. 长期单施化肥对土壤性状及作物产量的影响[J]. 应用生态学报, 2001, 12(4): 569-572.
Lü J L, Zhang Y P, Wang X D *et al*. Effect of long-term single application of chemical fertilizer on soil properties and crop yield [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(4): 569-572.

[20] 范秀艳, 杨恒山, 高聚林,等. 施磷方式对高产春玉米磷素吸收与磷肥利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19 (2): 312-320.
Fan X Y, Yang H S, Gao J L *et al*. Effects of phosphorus fertilization methods on phosphorus absorption and utilization of high yield spring maize [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(2): 312-320.

[21] 刘建玲, 张福锁. 小麦-玉米轮作长期肥料定位试验中土壤磷库的变化 Ⅰ. 磷肥产量效应及土壤总磷库、无机磷库的变化[J]. 应用生态学报, 2000, 11(3): 360-364.
Liu J L, Zhang F S. Dynamics of soil P pool in a long-term fertilizing experiment of wheat-maize rotation Ⅰ. Crop yield effect of fertilizer P and dynamics of soil total P and inorganic P [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(3): 360-364.

[22] 王莲莲, 张树兰, 杨学云. 长期不同施肥和土地利用方式对塿土耕层碳储量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 404-412.
Wang L L, Zhang S L, Yang X Y. Soil carbon storage as affected by long-term land use regimes and fertilization in manural loess soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19 (2): 404-412.

[23] 王智平, 陈全胜. 植物近期光合碳分配及转化[J]. 植物生态学报, 2005, 29(5): 845-850.
Wang Z P, Chen Q S. Recently photosynthesized carbon allocation and turnover: A minor review of the literature[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2005, 29(5): 845-850.

[24] 杨兰芳, 蔡祖聪. 玉米生长和施氮水平对土壤有机碳更新的影响[J]. 环境科学学报, 2006, 26 (2): 280-286.
Yang L F, Cai Z C. Effects of growing maize and N application on the renewal of soil organic carbon [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26 (2): 280-286.

[25] 尚辉, 孙智广, 陈慧杰,等. 不同施肥对作物碳储量及土壤碳固定的影响[J]. 西北农业学报, 2013, 22 (11): 65-70.
Shang H, Sun Z G, Chen H J *et al*. Effect of different fertilization practices on crop carbon storage and soil carbon

sequestration[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2013, 22(11): 65-70.

[26] 杜红霞, 吴普特, 王百群,等. 施磷对夏玉米土壤硝态氮、吸氮特性及产量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2009, 37 (8): 121-126.
Du H X, Wu P T, Wang B Q *et al*. Influence of applying phosphorus on soil nitrate and nitrogen uptake and yield of summer maize [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2009, 37 (8): 121-126.

[27] 刘臧珍, 王淑敏, 杨丽琳. 秸秆还田添加氮素调节碳氮比的研究[J]. 河北农业大学学报, 1995, 18(3): 31-35.
Liu C Z, Wang S M, Yang L L. Study on adjustment of the ratio of C to N by adding N during straw turnover[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 1995, 18 (3): 31-35.

[28] 吕丽华, 陶洪斌, 王璞, 等. 施氮量对夏玉米碳、氮代谢和氮利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14 (4): 630-637.
Lü L H, Tao H B, Wang P *et al*. The effect of nitrogen application rate on carbon and nitrogen metabolism and nitrogen use efficiency of summer maize[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14 (4): 630-637.

[29] Tsai C L, Dweikat I, Tsai C Y. Effects of source supply and sink demand on the carbon and nitrogen ratio in maize kernels[J]. Maydica, 1990, 35(4): 391-397.

[30] 刘芳, 亓新华. 氮肥对冬小麦碳氮营养代谢的影响[J]. 山东农业科学, 1989, (5): 5-8.
Liu F, Qi X H. Effect of nitrogenous fertilizer on metabolism of carbon and nitrogen in winter wheat[J]. Journal of Shandong Agricultural Sciences, 1989, (5): 5-8.

[31] 吕丽华, 陶洪斌, 王璞, 等. 种植密度对夏玉米碳氮代谢和氮利用率的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(4): 718-723.
Lü L H, Tao H B, Wang P *et al*. Carbon and nitrogen metabolism and nitrogen use efficiency in summer maize under different planting densities[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(4): 718-723.

[32] 潘根兴, 周萍, 张旭辉, 等. 不同施肥对水稻土作物碳同化与土壤碳固定的影响——以太湖地区黄泥土肥料长期试验为例[J]. 生态学报, 2006, 26 (11): 3704-3710.
Pan G X, Zhou P, Zhang X H *et al*. Effect of different fertilization practices on crop carbon assimilation and soil carbon sequestration: A case of a paddy under a long-term fertilization trial from the Tai Lake region, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26 (11): 3704-3710.

[33] Manna M C, Swarup A, Wanjari R H *et al*. Soil organic matter in a west Bengal inceptisol after 30 years of multiple cropping and fertilization[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70 (1): 121-129.

[34] Zhang W J, Wang X J, Xu M G *et al*. Soil organic carbon dynamics under long-term fertilizations in arable land of northern China[J]. Biogeosciences, 2010, 7 (2): 409-425.

[35] Mohammad W, Shah S M, Shehzadi S *et al*. Effect of tillage, rotation and crop residues on wheat crop productivity, fertilizer nitrogen and water use efficiency and soil organic carbon status in dry area (rainfed) of north-west Pakistan[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2012, 12 (4): 715-727.