植物营养与肥料学报 2017, 23(4): 864–873
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer
doi: 10.11674/zwyf.16417
http://www.plantnutrifert.org

减量施肥下小麦产量、肥料利用率和土壤养分平衡

赵亚南[1]，宿敏敏[2]，吕 阳[2]，况福虹[2]，陈轩敬[1]，张跃强[1,3]，石孝均[1,3*]
（1 西南大学资源环境学院，重庆 400716；2 中国农业大学资源与环境学院，北京 100093；
3 国家紫色土肥力与肥料效益监测基地，重庆 400716）

摘要:【**目的**】我国化肥过量施用现象普遍，不利于生态环境保护和农业可持续生产。研究化肥减量施用对小麦产量、籽粒灌浆和肥料利用率的影响，可以为我国化肥高效施用和零增长目标提供理论依据。【**方法**】在四川盆地进行了两个大田试验，以习惯施肥 (N、P_2O_5、K_2O 分别为 180、120、45 kg/hm^2) 为对照，设置减量施肥 (N、P_2O_5、K_2O 分别为 96、60、45 kg/hm^2) 处理，测定了小麦产量及构成、籽粒灌浆、花后干物质转运、旗叶叶绿素含量、养分平衡和肥料利用率。【**结果**】与习惯施肥相比，减量施肥下小麦产量、穗数、穗粒数没有显著变化，小麦–玉米轮作田块小麦千粒重显著提高 5.8%。根据 Logistics 方程拟合结果，减量施肥显著提高了小麦–玉米轮作田块小麦理论最大千粒重，渐增期、缓增期籽粒净增重，对其他灌浆参数影响不显著。减量施肥下小麦干物质转运量、转运率及其对籽粒灌浆的贡献率增加 28.5%、17.5% 和 20.7%，但花后旗叶叶绿素含量下降速度加快。习惯施肥和减量施肥土壤氮素盈余分别为 22.6 和 –30.2 kg/hm^2，土壤磷盈余分别为 80.4 和 22.8 kg/hm^2。减量施肥后氮肥偏生产力、农学效率和表观回收率比习惯施肥提高 79.2%、69.1% 和 27.9%，磷肥偏生产力、农学效率和表观回收率提高 91.1%、72.7% 和 68.5%。【**结论**】本试验的两年时间内，减量施肥可以维持小麦产量，促进小麦干物质转运及其对籽粒灌浆的贡献，但花后功能叶衰退加速。减量施肥下肥料利用率提高，土壤磷素盈余降低，土壤氮素亏缺，需要在确保维持小麦产量、土壤肥力和养分平衡的基础上，继续优化减氮量。

关键词: 小麦产量；籽粒灌浆；干物质转运；肥料利用率；养分平衡

Wheat yield, nutrient use efficiencies and soil nutrient balance under reduced fertilizer rate

ZHAO Ya-nan[1], SU Min-min[2], LÜ Yang[2], KUANG Fu-hong[2], CHEN Xuan-jing[1], ZHANG Yue-qiang[1,3], SHI Xiao-jun[1,3*]
(*1 College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China;*
2 College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100093, China;
3 National Monitoring Station of Soil Fertility and Fertilizer Efficiency on Purple Soils, Chongqing 400716, China)

Abstract:【**Objectives**】Excessive chemical fertilizer application is unfavorable for sustainable agricultural development. It is important to conduct optimize fertilization experiment for achieving fertilizer zero increase in China.【**Methods**】Two on-farm experiments were conducted in wheat-corn and wheat-rice rotation systems in a purple soil in the Sichuan Basin, southwest China. Taken conventional N, P_2O_5, K_2O input of 180, 120, 45 kg/hm^2 as control, reduced fertilizer rate (N, P_2O_5, K_2O input of 96, 60, 45 kg/hm^2) in wheat was applied. The wheat yield and its components, grain filling characteristics, translocation of dry matter and chlorophyll contents of flag leaves at the post-anthesis, nutrient balance and use efficiency were investigated.【**Results**】Compared with conventional fertilizer rate, wheat yield, the numbers of spikes, grains per spike and 1000-grain weight were not significantly changed under reduced fertilizer rate, expect for the 1000-grain weight in fields of wheat-maize

收稿日期：2016–11–08　　**接受日期：**2017–03–09
基金项目：国家自然科学基金项目（31471944）；中央高校学科团队项目基金（2362015xk06）；中央高校基本业务费专项资金（XDJK2016E156）资助。
作者简介：赵亚南(1986—)，男，河南商丘人，博士研究生，主要从事养分资源管理研究。E-mail：zhaoyanan2014@163.com
* 通信作者 E-mail：shixj@swu.edu.cn

cropping system. Based on the Logistic simulation model for the grain filling, the reduced fertilizer rate treatment significantly enhanced the maximum 1000-grain weight, the net increase of grain weight during the gradual and slow grain-filling periods, but not significant on other parameters. Reduced fertilizer rate increased the dry matter translocation, efficiency and contribution to grain by 28.5%, 17.5% and 20.7%, respectively, but accelerated the decline of chlorophyll in wheat flag leaves after flowering. Under conventional fertilizer rate, the soil N and P had surplus of 22.6 and 80.4 kg/hm^2, respectively; under reduced rate soil N had a deficit of 30.2 kg/hm^2, but still had a surplus P of 22.8 kg/hm^2. The respective nutrient use efficiencies indicated by the partial factor productivity, agronomic efficiencies and apparent recovery efficiencies were significantly improved by 79.2%, 69.1% and 27.9% for the N fertilizer, and 91.1%, 72.7% and 68.5% for the P fertilizer. 【**Conclusions**】In Sichuan Basin, the reduced fertilizer rate maintained the wheat yield, improved the nutrient use efficiencies, P balance, efficient translocation of dry matter and contribution to grain filling, but caused the deterioration of flag leaves and the soil N loss, which might result in a fertility decline especially in a long-term period due to an insufficiency under the current reduction rate of N fertilizers. Therefore, rational N fertilization rate needs to be further optimized in the future.

Key words: wheat yield; grain filling; dry matter translocation; nutrient use efficiency; nutrient balance

施用化肥对提高作物产量、确保我国粮食安全有重要意义[1]，但近年来我国过量施用化肥现象普遍，导致肥料利用率偏低[2]，不仅没有促进作物增产，还造成了严重的环境污染，不利于农业可持续发展[3–5]。因此，优化施肥管理，提高肥料利用率已成为当前农业生产的重要挑战。减量施肥正是在此背景下发展起来的养分管理技术，即在保证作物产量稳定的前提下，减少肥料投入，以提高肥料利用率、降低环境污染。很多研究表明，在蔬菜[6–9]、水稻[10–12]、水稻–小麦[13]、小麦–玉米[14–15]、玉米–大豆[16–17]、玉米–油菜[18]等作物和轮作体系中，适量减肥并没有引起产量显著变化，且改善了作物品质、提高了肥料利用率和经济效益，降低了养分的环境损失和污染，达到节肥增效的目的。

减量施肥会影响籽粒灌浆过程和特性，进而影响籽粒重和作物产量[19]。有研究表明，平衡施用氮磷钾能够提高玉米籽粒灌浆速率和持续时间，但过量施肥下二者之间的变化很小[20]。李科江等在小麦上的研究也发现，随着施氮量增加，小麦籽粒灌浆速率下降，进而导致千粒重下降[21]。籽粒灌浆期间干物质累积主要有两个来源，一是花前合成并贮藏于营养器官、花后再转移到籽粒的同化物，二是花后合成并直接运移至籽粒的光合产物[19]，因此施肥对籽粒灌浆的影响与干物质转运以及花后功能叶的光合能力有关。据报道，增施氮肥降低了干物质转运量和对籽粒的贡献率，增加了花后的同化量和贡献率[22]，而适量减氮可以提高玉米和大豆干物质转运量及其对籽粒的贡献率，进而增大灌浆速率、百粒重和产量[16–17]。

受气候条件和土壤肥力等因素的影响，减量施肥效果可能存在着很大的区域性差异。限于冬季光照不足等气候因素，四川盆地小麦单产明显低于河南、山东、河北等地区，但该地区肥料用量却持续增加[23]，这可能导致施肥量超过小麦养分需求量，进而导致肥料利用率偏低、养分损失严重[24]，但目前关于该地区小麦减量施肥效果的研究未见报道。为此，本文研究了减量施用化肥对四川盆地小麦产量、籽粒灌浆、干物质转运和肥料利用率的影响，旨在明确减量施肥在四川盆地小麦生产上的可行性，揭示减量施肥影响小麦产量的机制，为该区域作物高效施肥、实现化肥零增长的目标提供理论和技术依据。

1　材料与方法

1.1　试验点概况

试验位于重庆市江津区永兴镇黄庄村的现代粮油科技示范园内，地理位置为东经 106°11′22″，北纬 29°03′51″，海拔 285 m。该试验点位于四川盆地东南部，属亚热带季风性湿润气候，年均温度 18.4℃，年均降雨量 1016.6 mm，年均相对湿度 82%，年均日照时数 1215.8 h。供试土壤为紫色土，耕层土壤 (0—20 cm) 基础性质为：容重 1.15 g/cm^3，粘粒 246 g/kg，pH 4.9，有机质 26.9 g/kg，全氮 2.0 g/kg，碱解氮 119.8 mg/kg，全磷 0.3 g/kg，有效磷 8.2 mg/kg，全钾 16.6 g/kg，速效钾 114.1 mg/kg。本试验选取毗邻的 2 个田块，试验开展前作物种植模式为一季中稻，冬季灌水休闲，当地称为“冬水田”，即每年 4

月底至 8 月底为水稻生长期，水稻收获后淹水闲置。于 2012 年秋季开始试验，水稻收获后变更种植模式为小麦–水稻轮作 (WR) 和小麦–玉米轮作 (WM)。本研究为 2012 年 11 月至 2013 年 5 月以及 2013 年 11 月至 2014 年 5 月两季小麦试验结果，小麦–水稻轮作和小麦–玉米轮作仅为了区分两个田块，不做种植制度间的对比。

1.2 试验设计

2 个田块均设置习惯施肥 (FP) 和减量施肥 (RF) 处理，同时设置不施氮肥对照 (CN) 和不施磷肥对照 (CP) 处理，以计算氮肥和磷肥的利用率。习惯施肥处理氮 (N)、磷 (P_2O_5)、钾 (K_2O) 肥用量根据调研获得的当地农民习惯施肥水平确定，分别为 180、120 和 45 kg/hm^2；减量施肥处理的施肥量根据目标产量和养分平衡法估算确定，即，施肥量 = (作物养分吸收量 – 土壤养分供应量)/肥料利用率，作物养分吸收量为目标产量下作物地上部养分吸收量，土壤养分供应量为不施氮或磷肥时作物地上部养分吸收量。作物养分吸收量和土壤养分供应量根据本研究小组相同气候和土壤条件下 20 年 (1991～2011 年) 的长期定位施肥试验结果确定：作物吸氮 (磷) 量和土壤供氮 (磷) 量分别对应氮磷钾平衡施肥处理小麦地上部吸氮 (磷) 量和不施氮 (磷) 处理地上部吸氮 (磷) 量。氮、磷肥利用率为表观回收率，取值分别为 50% 和 20%。根据以上结果确定减量施肥处理氮、磷肥用量分别为 96 和 60 kg/hm^2。不施氮肥对照的磷、钾肥用量和分配比例与减量施肥处理相同；不施磷肥对照的氮、钾肥用量和分配比例与减量施肥处理相同。氮肥 50% 作为基肥在小麦播种前撒施，其余 50% 于拔节前撒施；磷、钾肥全部于小麦播种前作为基肥撒施。氮肥类型为尿素，磷肥为过磷酸钙，钾肥为氯化钾。每个处理 4 次重复，随机区组排列。习惯和减量施肥处理小区面积均为 40 m^2，不施氮和不施磷对照小区面积均为 20 m^2。小麦于 11 月上旬播种，次年 5 月上旬收获，播种前先撒施基肥并旋耕入土，播种密度为行窝距 27 cm × 17 cm，小麦品种为川麦 45，由四川省农业科学院提供。

1.3 取样与分析

每个试验小区均划定测产区和取样区，测产区小麦全部脱粒称重，取部分籽粒烘至恒重，根据实际水分含量换算为 13% 含水量下的产量。同时在取样区随机选取连续 20 窝小麦 (避开边行)，贴地面割取地上部，装入网袋，里外各放入标签，扎口带回实验室考种。考种时，每个小区随机选取 20 株测定株高和穗长，并放回全部脱粒，籽粒与秸秆分别在 80℃ 烘箱中烘至恒重，记录重量，测千粒重。根据籽粒和秸秆产量计算收获指数，根据测产区籽粒产量和收获指数计算秸秆产量。考种样品粉碎后分别测定籽粒和秸秆的氮、磷含量，采用 H_2SO_4–H_2O_2 消煮后，凯氏法测氮素含量，钒钼黄比色法测磷素含量[25]。

第一季小麦扬花前 (2013 年 3 月 17 日)，在取样区选择长势均匀、同一时期开花的主茎穗 100 株挂牌标记，扬花后每隔 7 d 取样，每处理每次取 10 株。取样后立即将籽粒与秸秆分离，带回实验室后 105℃ 杀青 30 min，80℃ 烘干至恒重，测定干物重及千粒重。分别于扬花后 21 d (4 月 7 日)、28 d (4 月 14 日) 和 35 d (4 月 21 日) 随机选取 20 株标记样品，用 SPAD 便捷式叶绿素含量测定仪测定旗叶叶绿素含量。

1.4 数据处理与统计分析

小麦籽粒灌浆过程用 Logistic 方程进行拟合[26–27]，拟合方程为 $y = a/(1 + be^{-ct})$，其中 y 为籽粒千粒重，t 为开花至观测时的天数，a、b 和 c 是为方程参数。当 t 趋向于无限大时，$y = a$，为理论最大千粒重 (W_{max})；当 $t = 0$ 时，$y = a/(1 + b)$，为籽粒起始灌浆势 (W_0)，即灌浆开始时 (T_0) 的千粒重。对 Logistic 方程求一阶导数得籽粒灌浆速率方程，对灌浆速率方程求导 (即对 Logistic 方程求二阶导数)，令其等于零，得籽粒最大灌浆速率出现时间 ($T_{max} = \ln b/c$)，代入灌浆速率方程得最大灌浆速率 ($V_{max} = ac/4$)。对灌浆速率方程求二阶导数 (即对 Logistic 方程求三阶导数)，令其等于零，得 $T_1 = (\ln b - 1.317)/c$ 和 $T_2 = (\ln b + 1.317)/c$，即区分灌浆过程渐增期、快增期和缓增期的两个拐点。令籽粒达到理论最大粒重 95% 的时间为 T_3，将灌浆过程划分为 3 个阶段：T_0 至 T_1 为灌浆渐增期，T_1 至 T_2 为灌浆快增期，T_2 至 T_3 为灌浆缓增期。W_1、W_2、W_3、D_1、D_2、D_3、V_1、V_2、V_3 分别为 3 个阶段的籽粒净增重、持续时间和平均灌浆速率。

花后干物质转运量、转运率及转移干物质对籽粒的贡献率计算方法为[19]：

小麦花后干物质转运量 (DMTQ，g/stem) = 扬花期营养体干物质重 – 收获期营养体干物质重

花后干物质转运率 (DMTE) = 花后干物质转运量/扬花期营养体干物质重 × 100%

小麦花后干物质转运对籽粒的贡献率 (DMTC) = 花后干物质转运量/收获期籽粒重 × 100%

肥料利用率用偏生产力 (PFP)、农学效率 (AE)

和表观回收率 (RE) 表征[2]，计算方法：

$$PFP\ (kg/kg) = Y_f/R_f$$

$$AE\ (kg/kg) = (Y_f - Y_0)/R_f$$

$$RE\ (\%) = (U_f - U_0)/R_f$$

式中：Y_f 和 Y_0 分别为施氮 (磷) 和不施氮 (磷) 对照的作物籽粒产量；U_f 和 U_0 分别为施氮 (磷) 和不施氮 (磷) 对照的作物地上部养分吸收量；R_f 为氮 (磷) 肥用量。

小麦籽粒灌浆过程拟合和回归分析用 SigmaPlot 12.0 软件进行，数据处理和统计分析用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 20.0 软件进行。处理间差异显著性检验方法为单因素方差分析和配对样本 *t* 检验，显著性水平为 $P < 0.05$。

2　结果与分析

2.1　减量施肥对小麦产量及其构成的影响

图 1 显示，两个田块不施氮、磷对照的小麦产量显著低于习惯施肥和减量施肥处理，且 2012～2013 年小麦-水稻轮作无氮对照小麦产量显著低于无磷对照。减量施肥和习惯施肥处理之间差异不显著。

从产量构成来看，不施氮、磷对照产量下降的原因是穗数和穗粒数显著下降，但千粒重增加，株高和穗长显著下降 (表 1)。与习惯施肥比，小麦-玉米田块减量施肥处理的穗数和穗粒数没有显著差异，但千粒重有增加趋势，小麦-玉米田块显著提高。减量施肥对株高和穗长的影响不显著。

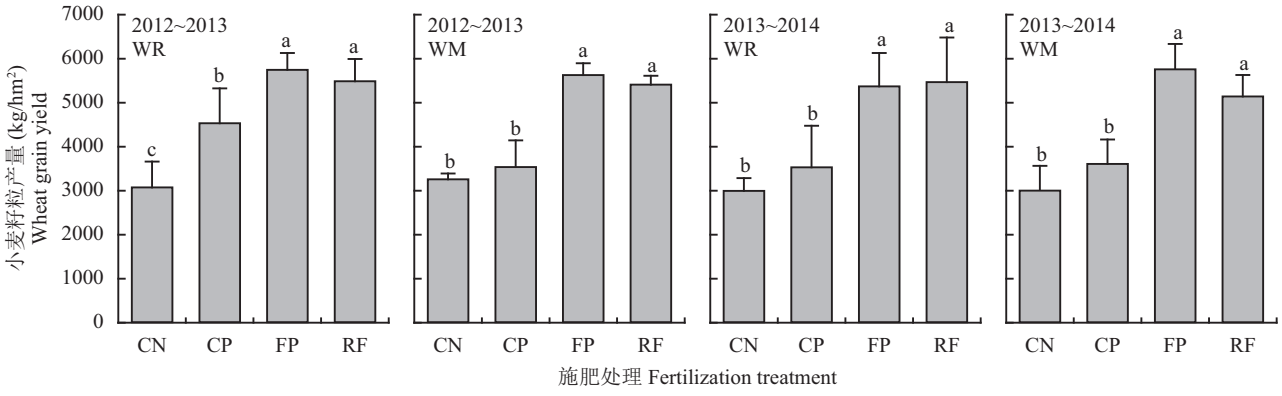

图 1　不同施肥下小麦产量

Fig. 1　Grain yield of wheat under the reduced fertilizer rates

[注（Note）：WR—小麦–水稻轮作 Wheat–rice rotation; WM—小麦–玉米轮作 Wheat–maize rotation；CN—无氮对照 N omission; CP—无磷对照 P omission; FP—习惯施肥 Farmers' practice; RF—减量施肥 Reduced fertilizer rate; 方柱上不同小写字母表示处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著 Values followed by different letters are significantly different among different treatments at $P < 0.05$.]

表 1　不同施肥下小麦产量构成

Table 1　Effects of the reduced fertilizer rates on yield components of wheat

田块 Field	处理 Treatment	穗数 (×10⁴/hm²) Spike No.	穗粒数 Grains per spike	千粒重 (g) 1000-grain weight	株高 (cm) Plant height	穗长 (cm) Spike length
小麦–水稻轮作 Wheat-rice rotation	无氮对照 CN	189.5 ± 22.1 b	38.2 ± 1.9 b	46.8 ± 1.1 a	74.1 ± 1.7 b	9.8 ± 0.5 b
	无磷对照 CP	210.2 ± 11.3 b	43.5 ± 3.4 a	43.7 ± 2.0 b	74.5 ± 1.6 b	11.6 ± 0.7 a
	习惯施肥 FP	301.4 ± 11.4 a	45.9 ± 1.0 a	40.7 ± 2.5 b	79.3 ± 1.5 a	12.0 ± 0.5 a
	减量施肥 RF	278.9 ± 17.2 a	44.1 ± 3.6 a	42.6 ± 1.9 b	78.2 ± 2.6 a	11.8 ± 0.3 a
小麦–玉米轮作 Wheat-maize rotation	无氮对照 CN	223.3 ± 19.0 b	29.9 ± 4.5 b	49.0 ± 0.4 a	71.1 ± 3.1 b	9.0 ± 0.8 c
	无磷对照 CP	205.3 ± 20.6 b	33.4 ± 1.6 b	47.4 ± 1.3 a	70.8 ± 2.3 b	10.0 ± 0.8 bc
	习惯施肥 FP	306.0 ± 12.6 a	40.5 ± 3.9 a	44.2 ± 2.6 b	76.7 ± 1.8 a	11.5 ± 0.6 a
	减量施肥 RF	285.4 ± 7.8 a	39.1 ± 2.7 a	46.8 ± 1.4 a	76.9 ± 1.8 a	11.1 ± 0.5 ab

注（Note）：CN—N omission; CP—P omission; FP—Farmers' practice; RF—Reduced fertilizer rate. 数据表示为平均值 ± 标准差 Data showed as mean ± SD; 同列数据后不同小写字母表示不同处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著 Date with different lowercases are significantly different among different treatments at $P < 0.05$.

2.2 减量施肥对籽粒灌浆的影响

在整个灌浆期间，除了花后第 42 d 时减量施肥处理籽粒千粒重显著高于习惯施肥，其他时期差异均不显著 (图 2)。Logistics 方程可以很好地拟合籽粒灌浆过程 ($R^2 > 0.95$，$P < 0.05$)，拟合结果表明 (表 2)，理论最大千粒重为 44.4～49.0 g，花后第 23～25 d 籽粒达到最大灌浆速率 1.42～1.62 g/d。籽粒灌浆渐增期约在花后 14 d 以前；快增期在花后第 14 d 至 34 d，持续 19～22 d；其后为缓增期，在花后第 47 d 左右小麦千粒重达到理论最大千粒重的 95%。在渐增期、快增期和缓增期，籽粒净增重比例分别为 21%、58% 和 16%。与习惯施肥相比，小麦–玉米田块减量

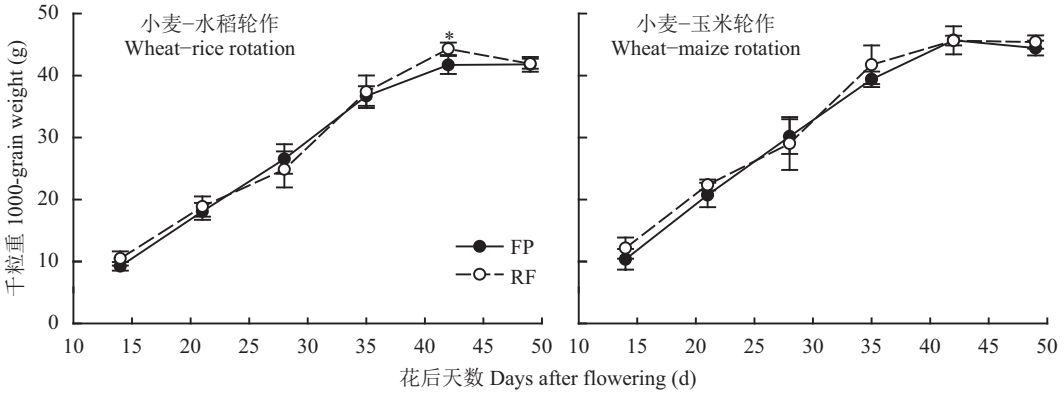

图 2 不同施肥下小麦籽粒灌浆动态

Fig. 2 Effects of reduced fertilizer rates on grain filling dynamics of wheat

[注（Note）：* 表示同一时期处理间差异显著($P < 0.05$) Indicates significant difference between treatments in the same period ($P < 0.05$). FP—习惯施肥 Farmers' practice; RF—减量施肥 Reduced fertilizer rate.]

表 2 不同管理措施下小麦籽粒灌浆特征参数

Table 2 Grain filling parameters of wheat in different rotation systems under reduced fertilizer rate

灌浆参数 Filling parameter	小麦–水稻轮作 Wheat–rice rotation		小麦–玉米轮作 Wheat–maize rotation	
	习惯施肥 Conventional	减量施肥 Reduced	习惯施肥 Conventional	减量施肥 Reduced
W_0	1.70 ± 0.55 a	2.15 ± 0.68 a	1.87 ± 0.50 a	2.60 ± 0.61 a
W_{max} (g)	44.4 ± 1.1 a	46.9 ± 2.4 a	47.1 ± 1.0 b	49.0 ± 1.9 a
T_{max} (d)	24.2 ± 0.7 a	25.0 ± 1.9 a	23.1 ± 1.1 a	23.2 ± 2.1 a
V_{max} (g/d)	1.50 ± 0.12 a	1.44 ± 0.13 a	1.64 ± 0.15 a	1.54 ± 0.14 a
W_1 (g)	9.4 ± 0.2 a	9.9 ± 0.5 a	10.0 ± 0.2 b	10.3 ± 0.4 a
W_2 (g)	25.7 ± 0.7 a	27.1 ± 1.4 a	27.2 ± 0.6 b	28.3 ± 1.1 a
W_3 (g)	7.2 ± 0.2 a	7.6 ± 0.4 a	7.6 ± 0.2 b	7.9 ± 0.3 a
D_1 (d)	14.3 ± 0.8 a	14.2 ± 0.9 a	13.6 ± 1.1 a	12.6 ± 1.1 a
D_2 (d)	19.7 ± 2.1 a	21.7 ± 3.2 a	19.0 ± 1.7 a	21.1 ± 2.9 a
D_3 (d)	12.2 ± 1.3 a	13.4 ± 2.0 a	11.8 ± 1.1 a	13.1 ± 1.8 a
V_1 (g/d)	0.66 ± 0.06 a	0.70 ± 0.06 a	0.74 ± 0.06 a	0.83 ± 0.07 a
V_2 (g/d)	1.31 ± 0.11 a	1.26 ± 0.11 a	1.44 ± 0.13 a	1.35 ± 0.13 a
V_3 (g/d)	0.59 ± 0.05 a	0.57 ± 0.05 a	0.65 ± 0.06 a	0.61 ± 0.06 a

注（Note）：W_{max}—理论最大千粒重 Maximum 1000-grain weight；W_0—起始灌浆势 Initial grain-filling potential；T_{max}—最大灌浆速率出现时间 Time of maximum grain-filling rate；V_{max}—最大灌浆速率 Maximum grain-filling rate；W_1、W_2 和 W_3 分别为灌浆渐增期、快增期和缓增期籽粒净增重 W_1, W_2 and W_3 represent the grain weight increases during gradual, fast and slow growth periods；D_1、D_2 和 D_3 分别为灌浆渐增期、快增期和缓增期持续时间 D_1, D_2 and D_3: duration of gradual, fast and slow growth periods；V_1、V_2 和 V_3 分别为灌浆渐增期、快增期和缓增期平均灌浆速率 V_1, V_2 and V_3: average rates of grain-filling during gradual, fast and slow growth periods. 同行数据后不同字母表示施肥处理间差异显著 Values follwed by different letters in a row are significantly different between treatments at $P < 0.05$.

施肥处理理论最大千粒重、渐增期和缓增期籽粒净增重显著提高，但对其他灌浆参数的影响均未达到显著差异。

2.3　减量施肥对花后干物质转运的影响

减量施肥显著影响小麦花后干物质转运 (图 3)。两个田块习惯施肥处理花后干物质转运量分别为 0.71 和 0.71 g/stem，转运率为 23.2% 和 22.7%，花后干物质转运对籽粒的贡献为 32.1% 和 31.1%。减量施肥处理花后干物质转运量分别增加了 28.2% 和 28.9%，平均 28.5%；转运率分别增加了 12.6% 和 22.4%，平均 17.5%；花后干物质转运对籽粒灌浆的贡献率分别增加了 18.4% 和 23.1%，平均 20.7%。

2.4　减量施肥对花后旗叶叶绿素含量的影响

小麦花后旗叶叶绿素含量呈下降趋势，减量施肥处理下降速度快于习惯施肥处理 (图 4)。从小麦开花第 21 d 到 35 d，习惯施肥分别从 47.9 和 47.0 下降至 43.4 和 39.6，减量施肥处理分别从 46.6 和 44.6 下降至 34.6 和 26.8。花后第 21 d 和 28 d 减量施肥和习惯施肥处理之间旗叶叶绿素含量差异不显著；花后第 35 d，减量施肥处理小麦旗叶叶绿素含量显著低于习惯施肥。

2.5　减量施肥对土壤养分平衡的影响

由表 3 可见，不施氮、磷对照处理通过作物收获移走的氮素和磷素 (即地上部吸氮、磷量) 显著低于习惯施肥和减量施肥处理，两个处理的吸氮量和吸磷量也分别代表土壤氮素和磷素供应能力，分别为 62.4～69.4 kg/hm² 和 22.1～29.8 kg/hm²，平均分别为 65.5 和 24.4 kg/hm²。习惯施肥下，小麦作物收获带走的氮素为 143.2～170.6 kg/hm²，平均为 154.5 kg/hm²；减量施肥处理显著下降至 118.1～136.5

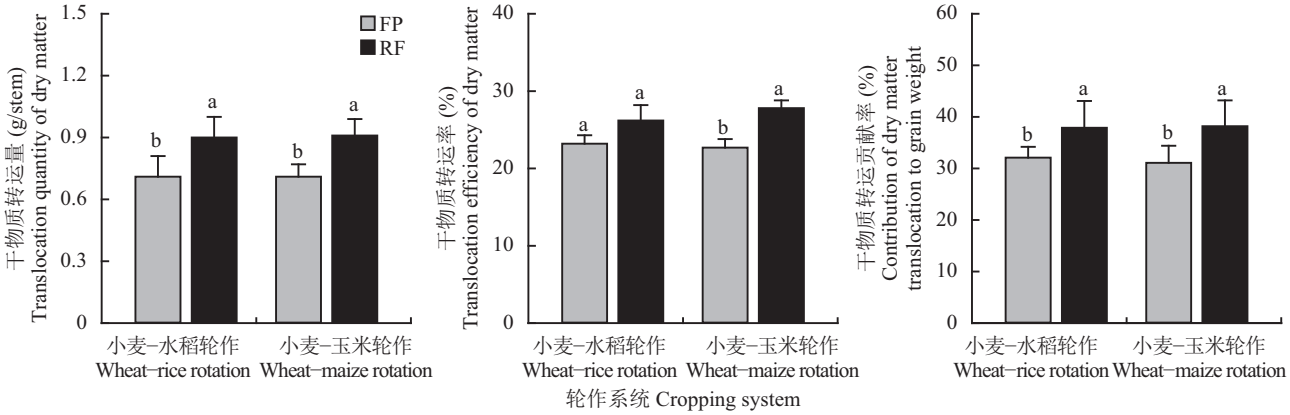

图 3　不同施肥下小麦干物质转运量、转运率和贡献率

Fig. 3　Effects of the reduced fertilizer rates on the translocation quantity and efficiency of dry matter, and its contribution to grain production

[注（Note）：FP—习惯施肥 Farmers' practice; RF—减量施肥 Reduced fertilizer rate.
方柱上不同字母表示处理间在 $P < 0.05$ 差异显著 Different letters above the bars are significantly different at $P < 0.05$.]

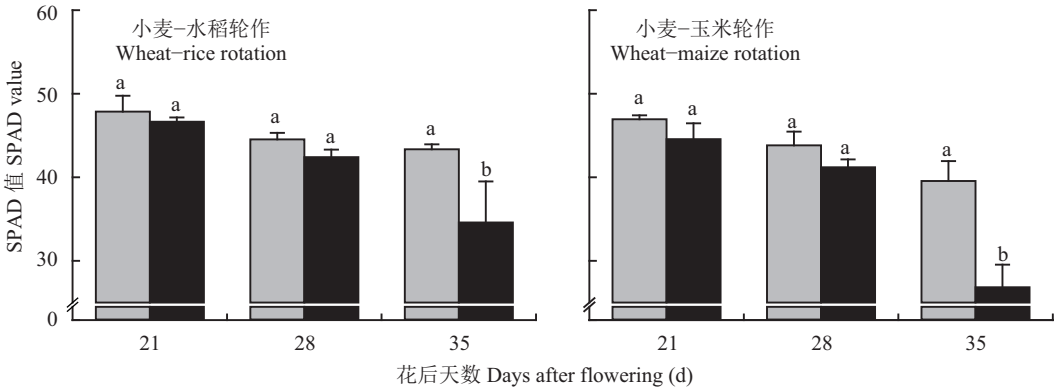

图 4　不同施肥下花后小麦旗叶叶绿素含量

Fig. 4　SPAD of wheat flag leaves at the post-anthesis under reduced fertilizer rate

[注（Note）：方柱上不同字母表示处理间在 $P < 0.05$ 差异显著 Different letters above the bars are significantly different at $P < 0.05$.]

表 3 不同施肥处理对土壤养分平衡的影响

Table 3 Effects of different fertilizer practice on soil nutrient balance

年份 Year	田块 Field	施肥处理 Fertilizer treatment	N		P_2O_5	
			作物收获 Crop harvest	表观平衡 N surplus	作物收获 Crop harvest	表观平衡 P surplus
2012～2013	小麦–水稻轮作 Wheat–rice rotation	无氮对照 CN	66.0 ± 8.6 d	–66.0 ± 8.6 c	25.0 ± 5.6 c	35.0 ± 5.6 b
		无磷对照 CP	89.8 ± 18.4 c	6.2 ± 18.4 a	29.8 ± 5.9 bc	–29.8 ± 5.9 d
		习惯施肥 FP	170.6 ± 11.4 a	9.4 ± 11.4 a	42.9 ± 6.2 a	77.1 ± 6.2 a
		减量施肥 RF	136.5 ± 5.9 b	–40.5 ± 5.9 b	38.0 ± 4.5 ab	22.0 ± 4.5 c
	小麦–玉米轮作 Wheat–maize rotation	无氮对照 CN	64.1 ± 3.6 d	–64.1 ± 8.6 c	23.5 ± 1.7 b	36.5 ± 1.7 b
		无磷对照 CP	71.8 ± 8.4 d	24.2 ± 18.4 a	23.6 ± 6.2 b	–23.6 ± 6.2 d
		习惯施肥 FP	145.3 ± 6.0 a	34.7 ± 6.0 a	37.0 ± 0.5 a	83.0 ± 0.5 a
		减量施肥 RF	118.1 ± 8.5 b	–22.1 ± 8.5 b	36.1 ± 6.0 a	23.9 ± 6.0 c
2013～2014	小麦–水稻轮作 Wheat–rice rotation	无氮对照 CN	62.4 ± 6.2 c	–62.4 ± 6.2 c	24.5 ± 3.3 b	35.5 ± 3.3 b
		无磷对照 CP	71.6 ± 8.5 c	24.4 ± 8.5 a	22.2 ± 5.8 b	–22.2 ± 5.8 d
		习惯施肥 FP	159.0 ± 5.8 a	21.0 ± 5.8 a	39.7 ± 4.3 a	80.3 ± 4.3 a
		减量施肥 RF	128.8 ± 12.5 b	–32.8 ± 12.5 b	38.6 ± 8.0 a	21.4 ± 8.0 c
	小麦–玉米轮作 Wheat–maize rotation	无氮对照 CN	69.4 ± 5.4 d	–69.4 ± 5.4 d	20.7 ± 5.0 b	39.3 ± 5.0 b
		无磷对照 CP	88.8 ± 7.1 c	7.2 ± 8.5 b	22.1 ± 3.4 b	–22.1 ± 3.4 d
		习惯施肥 FP	143.2 ± 2.0 a	36.8 ± 2.0 a	38.8 ± 3.4 a	81.2 ± 3.4 a
		减量施肥 RF	121.5 ± 9.1 b	–25.5 ± 9.1 c	36.1 ± 1.9 a	23.9 ± 1.9 c

注（Note）：氮 (磷) 素盈余 = 施氮 (磷) 量 – 作物收获氮 (磷) N (P) surplus = Fertilizer N(P) – N(P) uptake. CN—N omission; CP—P omission; FP—Farmers' practice; RF—Reduced fertilizer rate. 数据表示为平均值 ± 标准差 Data showed as mean ± SD; 同列数据后不同小写字母表示不同处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著 Date with different lowercases are significantly different among different treatments at $P < 0.05$.

kg/hm^2，平均为 126.2 kg/hm^2，平均降低 18.3%；习惯施肥和减量施肥处理土壤氮素盈余平均分别为 22.6 和 –30.2 kg/hm^2。习惯施肥和减量施肥处理小麦作物收获带走的磷素 (P_2O_5) 平均分别为 39.6 和 37.2 kg/hm^2，两者无显著差异；土壤磷素盈余分别为 80.4 和 22.8 kg/hm^2，减量施肥土壤磷素盈余显著低于习惯施肥。

2.6 减量施肥对肥料利用率的影响

与习惯施肥相比，减量施肥可以大幅度提高氮、磷肥利用率 (表 4)。2012～2013 年小麦–水稻轮作田块的磷肥表观回收率和 2013～2014 年小麦–玉米轮作系统的磷肥农学效率减量施肥和习惯施肥处理之间差异不显著；除此之外，减量施肥处理的氮肥和磷肥偏生产力、农学效率和表观回收率均显著高于习惯施肥。氮肥偏生产力、农学效率和表观回收率平均分别增加了 79.2%、69.1% 和 27.9%，磷肥偏生产力、农学效率和表观回收率平均增加了 91.1%、72.7% 和 68.5%。

3 讨论

3.1 减量施肥对小麦产量的影响

作物产量取决于穗数、穗粒数和千粒重之间的协调，其中粒重是产量的后期决定因子，由籽粒灌浆物质累积大小决定；籽粒灌浆物质来源包括花前合成贮藏于营养器官并在花后转移到籽粒的同化物，以及花后合成直接运移至籽粒的光合产物[19]。本试验条件下，减量施肥没有引起小麦产量显著变化，产量构成因子方面穗数和穗粒数也没有显著变化，但千粒重有增加趋势，Logistics 模拟籽粒灌浆动态也表明减量施肥理论最大千粒重显著高于习惯施肥，这和其他研究结果一致[16–17]。减量施肥后千粒重增加可能是因为花后干物质转运量、转运率及其对籽粒的贡献增加，促进了籽粒灌浆。樊高琼等[28]研究也表明，施氮可以提高小麦扬花后旗叶叶绿素含量，促进花后非结构性碳水化合物累积及其对籽粒的贡献，但过量施氮反而不利于茎鞘中可溶性糖向

表 4　不同施肥对肥料利用率的影响

Table 4　Effects of the reduced fertilizer rates on fertilizer use efficiencies

年份 Year	田块 Field	处理 Treatment	N			P_2O_5		
			偏生产力 PFP (kg/kg)	农学效率 AE (kg/kg)	表观回收率 RE (%)	偏生产力 PFP (kg/kg)	农学效率 AE (kg/kg)	表观回收率 RE (%)
2012～2013	小麦–水稻轮作 Wheat–rice rotation	习惯施肥 FP	31.9 ± 2.1 b	14.8 ± 1.4 b	58.1 ± 3.1 b	47.9 ± 3.2 b	10.1 ± 3.4 b	10.9 ± 2.1 a
		减量施肥 RF	57.2 ± 5.3 a	25.4 ± 1.4 a	73.4 ± 3.1 a	91.5 ± 8.4 a	15.9 ± 5.5 a	13.7 ± 5.5 a
	小麦–玉米轮作 Wheat–maize rotation	习惯施肥 FP	31.3 ± 1.5 b	13.2 ± 1.1 b	45.1 ± 1.8 b	46.9 ± 2.2 b	17.4 ± 3.1 b	11.1 ± 4.8 b
		减量施肥 RF	56.4 ± 2.1 a	22.4 ± 1.2 a	56.2 ± 5.2 a	90.2 ± 3.4 a	31.2 ± 7.2 a	20.8 ± 5.8 a
2013～2014	小麦–水稻轮作 Wheat–rice rotation	习惯施肥 FP	29.8 ± 4.2 b	13.2 ± 2.7 b	53.7 ± 1.1 b	44.8 ± 6.3 b	15.3 ± 3.2 b	14.6 ± 2.2 b
		减量施肥 RF	57.0 ± 10.6 a	25.8 ± 8.2 a	69.2 ± 9.7 a	91.1 ± 16.9 a	32.3 ± 11.0 a	27.3 ± 5.2 a
	小麦–玉米轮作 Wheat–maize rotation	习惯施肥 FP	32.0 ± 3.2 b	15.3 ± 2.7 b	41.0 ± 4.0 b	48.0 ± 4.8 b	17.9 ± 0.9 a	13.9 ± 2.0 b
		减量施肥 RF	53.6 ± 5.1 a	22.3 ± 4.4 a	54.2 ± 5.4 a	85.7 ± 8.1 a	25.6 ± 6.5 a	23.3 ± 5.9 a

注（Note）：FP—Farmers' practice; RF—Reduced fertilizer rate. PFP—Partial factor productivity; AE—Agronomic efficiency; RE—Apparent recovery efficiency. 同列数据后不同字母表示处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著 Values followed by different letters in a column are significantly different at $P < 0.05$ level.

籽粒的转运，花后非结构碳水化合物累积量及其对籽粒的贡献降低。本研究中减量施肥导致花后旗叶叶绿素含量下降速度加快，功能叶加速衰老，光合能力下降，限制了产量提高，这可能与后期养分供应不足有关。此外，本试验中小麦群体数量不高也是限制产量进一步提高的原因，同时发挥小麦群体和个体优势、促进花前干物质累积和转移及花后光合生产能力，进而提高小麦产量，将有利于减量施肥技术的应用。

3.2　减量施肥对肥料利用率和养分平衡的影响

本试验条件下，减量施肥处理小麦地上部吸氮量显著低于习惯施肥，而小麦产量没有显著变化，表明习惯施肥可能存在氮素奢侈吸收情况。减量施肥下，氮肥和磷肥偏生产力、农学效率和表观回收率均比习惯施肥大幅度提高，这和其他研究结果一致[10–15]，表明减量施肥技术可以提高养分利用率，降低环境损失，在我国粮食生产中具有一定的应用前景。

减量施肥在维持小麦产量、土壤肥力、系统可持续性的基础上，通过减少肥料用量，提高肥料利用率、降低环境损失。在本研究中，小麦氮肥利用率高于其他研究结果[2]，且减肥导致土壤氮素平衡出现亏缺，这可能是因为本试验田从淹水稻田转变为旱作后，土壤水分条件剧烈变化促进了有机质矿化[29]，土壤氮素供应能力较强[30]。因此，本试验实际小麦产量高于预期目标产量，氮素需求量也明显高于预计氮素需求量，这导致减肥处理的施氮量不足以补充作物带走的氮素，氮素平衡表现为亏缺状态，在当前小麦产量和氮素需求水平下，长期持续此减氮水平可能会造成土壤氮素肥力下降。因此，在确定减肥目标时，必须结合实际作物产量、养分需求量和土壤养分供应状况，以维持土壤长期生产力。本研究中，磷肥用量降低没有引起作物吸磷量显著变化，土壤磷素盈余显著降低，既可实现土壤磷素培肥目的，又可避免过量磷肥投入导致潜在的环境风险[4]。

4　结论

与习惯施肥相比，减量施肥对小麦产量没有显著影响，产量构成因子中穗数和穗粒数没有显著变化，千粒重有增加趋势。减量施肥影响小麦干物质转运及其对籽粒灌浆的贡献，提高了花后干物质转运量、转运率及其对籽粒灌浆的贡献率，但花后旗叶衰老速度加快，花后光合产物对籽粒灌浆的贡献降低。减量施肥可大幅度提高肥料利用率、降低土壤磷素盈余，但导致了土壤氮素亏缺，减量施肥需要确保土壤养分平衡、维持长期生产力。

参 考 文 献：

[1] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259–273.
Zhu Z L, Jin J Y. Fertilizer use and food security in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(2): 259–273.

[2] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915–924.

Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, *et al*. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 915–924.

[3] Ju X T, Xing G X, Chen X P, *et al*. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2009, 106: 3041–3046.

[4] Zhang Y Q, Wen M X, Li X P, *et al*. Long-term fertilization causes excess supply and loss of phosphorus in purple paddy soil[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2014, 94: 1175–1183.

[5] 刘金山, 戴健, 刘洋, 等. 过量施氮对旱地土壤碳、氮及供氮能力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 112–120.
Liu J S, Dai J, Liu Y, *et al*. Effects of excessive nitrogen fertilization on soil organic carbon and nitrogen and nitrogen supply capacity in dryland[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(1): 112–120.

[6] 姚春霞, 郭开秀, 赵志辉, 等. 减量施肥对三种蔬菜硝酸盐含量、营养品质和生理特性的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 153–156.
Yao C X, Guo K X, Zhao Z H, *et al*. Effects of fertilizing decreasing on nitrate contents, nutritional quality and biological characteristics of three vegetables[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(4): 153–156.

[7] 孙丽, 马友华, 何传龙, 等. 巢湖流域减量施肥对番茄产量品质和土壤硝态氮的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(25): 250–255.
Sun L, Ma Y H, He C L, *et al*. The effect of reducing fertilizer application on tomato production, quality and soil nitrate in Chaohu Lake Basin[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(25): 250–255.

[8] 何传龙, 马友华, 于红梅, 等. 减量施肥对保护地土壤养分淋失及番茄产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(4): 846–851.
He C L, Ma Y H, Yu H M, *et al*. Effect of reducing fertilizer application on soil nutrient leaching loss and tomato yield in plastic house[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(4): 846–851.

[9] 李永胜, 杜建军, 张稳成, 等. 菜心减量优化施肥效应研究[J]. 北方园艺, 2014, (14): 18–21.
Li Y S, Du J J, Zhang W C, *et al*. Effect of reducing fertilization and optimized fertilization on Chinese flowering cabbage[J]. Northern Horticulture, 2014(14): 18–21.

[10] 杜加银, 茹美, 倪吾钟. 减氮控磷稳钾施肥对水稻产量及养分累积的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(3): 523–533.
Du J Y, Ru M, Ni W Z. Effects of fertilization with reducing nitrogen, controlling phosphorus and stabilizing potassium on rice yield and nutrient accumulation[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(3): 523–533.

[11] 王道中, 张成军, 郭熙盛. 减量施肥对水稻生长及氮素利用率的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(1): 161–165.
Wang D Z, Zhang C J, Guo X S. Effects of lower fertilizer on rice growth and nitrogen use efficiency[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(1): 161–165.

[12] 李小波, 刘晓津, 赖玉嫦, 等. “薯–稻–稻” 轮作模式下双季稻施肥减量研究[J]. 热带作物学报, 2016, 37(10): 1877–1881.
Li X B, Liu X J, Lai Y C, *et al*. Reduced fertilization application in double rice cropping in the ‘Potato-Rice-Rice’ rotation system[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2016, 37(10): 1877–1881.

[13] 张均华, 刘建立, 张佳宝, 等. 施氮量对稻麦干物质转运及氮肥利用的影响[J]. 作物学报, 2010, 36(10): 1736–1742.
Zhang J H, Liu J L, Zhang J B, *et al*. Effects of nitrogen application rates on translocation of dry matter and utilization of nitrogen in rice and wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(10): 1736–1742.

[14] 刘学军, 巨晓棠, 张福锁. 减量施氮对冬小麦-夏玉米种植体系中氮肥利用与平衡的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 458–462.
Liu X J, Ju X T, Zhang F S. Effect of reduced N application on N utilization and balance in winter wheat summer maize cropping system[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(3): 458–462.

[15] 叶优良, 黄玉芳, 刘春生, 等. 氮素实时管理对冬小麦产量和氮素利用的影响[J]. 作物学报, 2010, 36(9): 1578–1584.
Ye Y L, Huang Y F, Liu C S, *et al*. Effect of in-season nitrogen management on grain yield and nitrogen use efficiency in wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(9): 1578–1584.

[16] 董茜, 雍太文, 刘小明, 等. 施氮方式对玉米–大豆套作体系中作物产量及玉米籽粒灌浆特征的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(8): 2018–2039.
Dong Q, Yong T W, Liu X M, *et al*. Effect of nitrogen application methods on crop yield and grain filling characteristics of maize in maize-soybean relay strip intercropping system[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(8): 2018–2039.

[17] 陈平, 杜青, 周丽, 等. 减量施氮及施肥距离对玉米/大豆套作系统增产节肥的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(8): 3247–3256.
Chen P, Du Q, Zhou L, *et al*. Effects of reduced N application rate and fertilizing distance on saving fertilizer and improving yield in maize/soybean intercropping system[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(8): 3247–3256.

[18] 段然, 汤月丰, 文炯, 等. 减量施肥对湖垸旱地作物产量及氮磷径流损失的影响[J]. 中国农业生态学报, 2013, 21(5): 536–543.
Duan R, Tang Y F, Wen J, *et al*. Effect of reducing fertilizer application on crop yield and nitrogen and phosphorus loss in runoff from embankment upland in Dongting Lake Region[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(5): 536–543.

[19] 李世清, 邵明安, 李紫燕, 等. 小麦籽粒灌浆特征及影响因素的研究进展[J]. 西北植物学报, 2003, 23(11): 2031–2039.
Li S Q, Shao M A, Li Z Y,*et al*. Review of characteristics of wheat grain filling and factors to influence it[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2003, 23(11): 2031–2039.

[20] Liu K, Ma B L, Luan L M, *et al*. Nitrogen, phosphorus, and potassium nutrient effects on grain filling and yield of high-yielding summer corn[J]. Journal of Plant Nutrition, 2011, 34: 1516–1531.

[21] 李科江, 李保国, 胡克林, 等. 不同水肥管理对冬小麦灌浆影响的模拟研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(5): 449–454.
Li K J, Li B G, Hu K L, *et al*. Modeling kernel filling of winter wheat for optimum field management[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(5): 449–454.

[22] 马冬云, 郭天财, 王晨阳, 等. 施氮量对冬小麦灌浆期光合产物积累、转运及分配的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(6): 1027–1033.
Ma D Y, Guo T C, Wang C Y, *et al*. Effects of nitrogen application

rates on accumulation, translocation, and partitioning of photosynthate in winter wheat at grain filling stage[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(6): 1027–1033.

[23] 叶优良, 韩燕来, 谭金芳, 崔振岭. 中国小麦生产与化肥施用状况研究[J]. 麦类作物学报, 2007, 27(1): 127–133.
Ye Y L, Han Y L, Tan J F,Cui Z L. Wheat production and fertilizer application in China[J]. Journal of Triticeae Crops, 2007, 27(1): 127–133.

[24] 范明生, 樊红柱, 吕世华, 等. 西南地区水旱轮作系统养分管理存在问题分析与管理策略建议[J]. 西南农业学报, 2008, 21(6): 1564–1568.
Fan M S, Fan H Z, Lü S H, *et al*. The current status of nutrient management and strategy in paddy rice-upland rotation in southwest China[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2008, 21(6): 1564–1568.

[25] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000: 208–314.
Lu R Q. Agricultural chemical analysis method of soil [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 208–314.

[26] 崔党群. Logistic曲线方程的解析与拟合优度测验[J]. 数理统计与管理, 2005, 24: 112–115.
Cui D Q. Analysis and making good fitting degree test for logistic curve regression equation[J]. Journal of Applied Statistics and Management, 2005, 24: 112–115.

[27] 吴晓丽, 汤永禄, 李朝苏, 等. 四川盆地小麦籽粒的灌浆特性[J]. 作物学报, 2014, 40(2): 337–345.
Wu X L, Tang Y L, Li C S, *et al*. Characteristics of grain filling in wheat grown in Sichuan Basin[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(2): 337–345.

[28] 樊高琼, 吴中伟, 郑亭, 等. 氮肥运筹对四川丘陵旱地带状种植小麦碳素同化、运转和产量的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(3): 238–243.
Fan G Q, Wu W Z, Zheng T, *et al*. Effect of nitrogen strategies on carbon assimilation, transfer and yield of strip-relay-inter-cropping wheat in Sichuan hilly areas[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(3): 238–243.

[29] Witt C, Cassman K G, Olk D C, *et al*. Crop rotation and residue management effects on carbon sequestration, nitrogen cycling and productivity of irrigated rice systems[J]. Plant and Soil, 2000, 225: 263–278.

[30] 王定勇, 石孝均, 毛知耘. 长期水旱轮作条件下紫色土养分供应能力的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(2): 120–126.
Wang D Y, Shi X J, Mao Z Y. Study on nutrient supplying capacity of purple soil under long-term rice-wheat rotation[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(2): 120–126.