西北农业学报 2019,28(4):557-566
Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica

网络出版日期:2019-04-17 doi: 10.7606/j.issn.1004-1389.2019.04.008
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1220.S.20190416.1621.013.html

超级早稻氮磷钾养分需求特征研究

谢 宜[1,2],周 旋[2],罗尊长[1,2],王玲玲[1,2],胡柯鑫[1,2],周孟瑜[3],董春华[2]

(1.湖南大学 研究生院 隆平分院,长沙 410125;2.湖南省土壤肥料研究所,长沙 410125;
3.湖南省浏阳市达浒镇农业综合服务站,湖南浏阳 410305)

摘 要 为高效提高超级早稻产量、肥料利用效率,以及指导相应缓/控释肥等新型肥料的研发,研究氮钾养分不同优化运筹条件下超级早稻的吸肥特性和土壤供肥特征,比较其产量与氮、磷、钾利用效率的差异。结果表明:与T2(氮钾肥基追比为基∶蘖=3∶2)相比,氮钾优化运筹处理(T3和T4)能有效提高早稻稻谷产量、干物质累积量及氮、磷、钾吸收利用效率及农学利用效率。其中,T4(氮肥基追比为基∶蘖∶穗=6∶2∶2,钾肥基追比为基∶蘖∶穗=5∶3∶2)稻谷产量和氮、磷、钾吸收利用效率及农学利用效率最高,其稻谷产量、干物质累积量较T3(氮肥基追比为基∶蘖∶穗=6∶2∶2,钾肥基追比为基∶蘖∶穗=6∶2∶2)分别提高3.2%、8.8%;氮肥、磷肥和钾肥吸收利用效率较T3分别提高16.6%、63.5%和15.7%。T4水稻氮、磷、钾养分累积及相应土壤养分供应特征更吻合超级早稻的养分需求特征。

关键词 超级早稻;需肥特征;产量;肥料利用效率

中图分类号 S143.1; S143.3 **文献标志码** A **文章编号** 1004-1389(2019)04-0557-10

中国自1996年启动超级稻计划以来,被农业部推广认定并保留的超级稻品种(组合)已超过130个,其推广应用对中国水稻增产增效有巨大贡献。目前,由于多数农户对超级稻营养特性和需肥特征认识不足,普遍重施氮肥,轻施磷、钾肥[1-2]。巨晓棠等[3]通过大量农户调查发现,过量施氮的田块约占总调查田块的30%。过量和不平衡施肥不仅未发挥超级稻的高产潜力,还易造成土壤板结、肥料利用率低及环境污染等问题[4-6]。因此,在提高超级稻产量和肥料利用率的同时,减少化肥投入,对超级稻高产高效栽培及经济效益和生态效益的提高具有极其重要的意义[7]。相关研究表明,氮肥的施用在作物产量和品质提升上起关键作用,而钾肥的投入也与氮肥的施用效果紧密相联,钾肥施用水平的高低不仅对作物株高、穗数、成穗率和每穗粒数有显著影响,而且还影响植株吸氮量和氮素转运率[8-10]。合理的运筹钾肥能有效提高抽穗后的干物质累积量,有利于改善水稻的群体质量[11]。

缓/控释肥是通过减缓或控制化肥养分的释放速率来使肥料养分供应更吻合作物对养分吸收的新型肥料[12-13]。目前,关于缓/控释肥料养分释放特性及相应施用技术的改进,均是根据作物的吸肥规律及相应土壤的供肥特征来匹配实现的。前人对新型缓/控释肥的研究方向主要集中在氮肥的氮素释放控制方面[14-18],包括控释材料筛选[19-20]、施用方式选取[21-23]及作物养分利用率提高[24-25]等,而通过氮钾运筹来探究养分释放的研究较少。为此,本研究于2017年开展氮钾养分不同优化运筹技术对超级早稻产量和氮、磷、钾利用效率影响的研究,揭示超级早稻的吸肥和土壤肥力供应规律,为超级早稻相应缓/控释肥等新型肥料的研发制备提供科学理论依据,为实现超级早稻化肥减施增效及农业环境可持续发展提供技术途径。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2017年在湖南省浏阳市达浒镇金石村稻田(E 113°52′54.8″,N 28°22′42.8″)进行。该地区年均气温17.5 ℃,年均降水量1 358.6~1 552.5 mm,蒸发量500 mm,无霜期275 d。土

收稿日期:2018-07-18 **修回日期**:2018-09-21
基金项目:"十三五"国家重点研发计划(2016YFD0200809);国家科技支撑计划(2015BAD23B03)。
第一作者:谢 宜,女,硕士研究生,从事植物营养与施肥研究。E-mail: 792768789@qq.com
通信作者:董春华,男,副研究员,主要从事植物营养与施肥研究。E-mail: dch1001@126.com

壤类型为水稻土，基础理化性质为 pH 5.48，有机质 24.3 g·kg^{-1}，全氮 1.62 g·kg^{-1}，全磷 0.39 g·kg^{-1}，全钾 19.1 g·kg^{-1}，碱解氮 121.2 mg·kg^{-1}，有效磷 11.3 mg·kg^{-1}，速效钾 65.3 mg·kg^{-1}。

1.2 试验材料

供试水稻品种为超级稻‘五丰优 286’。供试肥料氮肥为尿素（含 N 质量分数 46%），磷肥为过磷酸钙（含 P_2O_5 质量分数 12%），钾肥为氯化钾（含 K_2O 质量分数 60%）。

1.3 试验设计

试验设置 4 个处理：不施肥（T1）、常规施肥（氮钾肥基追比为基∶蘖＝3∶2，T2）、优化施肥模式 1（氮钾肥基追比为基∶蘖∶穗＝6∶2∶2，T3）和优化施肥模式 2（氮肥基追比为基∶蘖∶穗＝6∶2∶2，钾肥基追比为基∶蘖∶穗＝5∶3∶2，T4），以不施肥为对照。N 用量为 150 kg·hm^{-2}，P_2O_5 用量为 90 kg·hm^{-2}，K_2O 用量为 120 kg·hm^{-2}。磷肥做基肥，一次性施入。各处理重复 3 次，随机区组设计。小区面积为 5 m×8 m＝40 m^2，共 12 个小区，小区用田埂分开，田埂宽 20 cm，埂上覆膜。育秧方式选择标准化软盘旱育秧，3 月 20 日播种，4 月 16 日移栽。栽植规格为：株距×行距＝26.7 cm × 13.3 cm，每穴 4～5 株。具体施肥时期和用量见表 1。其他管理措施与当地水稻常规栽培管理一致。

表 1 不同处理施肥时期和施用量

Table 1 Fertilization period and application amount under different fertilization treatments kg·hm^{-2}

肥料种类 Fertilizer type	处理 Treatment	基肥 Base	蘖肥 Tillering	穗肥 Earing
尿素 Urea	T1	0.00	0.00	0.00
	T2	195.50	130.43	0.00
	T3	195.50	65.22	65.22
	T4	195.50	65.22	65.22
氯化钾 KCl	T1	0.00	0.00	0.00
	T2	119.94	79.91	0.00
	T3	119.94	40.03	40.03
	T4	100.00	59.97	40.03

1.4 测定指标与方法

1.4.1 样品采集及指标测定 在水稻种植前采用蛇形法取 0～20 cm 耕层土壤，风干后，测定土壤 pH 及有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷和速效钾质量分数。主要生育期采用梅花形五点法取 0～20 cm 耕层土壤，风干后，测定碱解氮、有效磷和速效钾质量分数。同时选取水稻植株 5 穴，杀青，烘干，称量干质量，测定植株氮、磷、钾质量分数（成熟期样品秸秆与籽粒分开）。收获时，各小区单打单收单晒测产。

1.4.2 基础理化指标测定 土壤 pH 采用 V(水)∶V(土)＝2.5∶1 电位计法测定；有机质采用重铬酸钾容量法－稀释热法测定；全氮、全磷、全钾分别采用蒸馏法、紫外分光光度法、火焰光度计法；植株氮、磷、钾质量分数经浓 H_2SO_4-H_2O_2 消煮后，分别采用蒸馏法、钒钼黄比色法和火焰光度计法测定；土壤碱解氮、有效磷和速效钾分别采用碱解扩散法、碳酸氢钠提取－钼锑抗比色法和乙酸铵提取－火焰光度计法测定[26]。

1.4.3 氮、磷、钾养分参数 3 种养分参数计算公式相同，以氮为例介绍如下：

氮总吸收量（TNA）＝稻谷产量×稻谷含氮量＋稻草产量×稻草含氮量

每 100 kg 籽粒需氮量（NAPG）＝氮总吸收量/稻谷产量×100

氮肥偏生产力（NPFP）＝施氮区产量/施氮量

氮肥利用率（NRE）＝（施氮区氮吸收总量－无氮区氮吸收总量）/ 施肥量×100%

氮肥农学利用率（NAE）＝（施氮区产量－无氮区产量）/施氮量×100%

1.5 数据处理

采用 Excel 2016 进行数据处理、分析及绘图，用 SPSS 19 进行单因素方差分析，多重比较采用邓肯新复极差法检验。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对水稻产量的影响

从表 2 可知，施肥处理早稻稻谷产量和总生物量均显著高于不施肥处理（$P<0.05$）。与 T2

相比，T3、T4 稻谷产量分别增加 1.1%和 4.4%，总生物量分别增加 0.01%和 3.4%。其中，T4 稻谷产量较 T3 显著提高 3.2%，总生物量提高 2.5%。

2.2　不同施肥处理水稻氮磷钾养分吸收利用

2.2.1　氮素吸收利用　由表 3 可知，施肥处理氮总吸收量和每 100 kg 籽粒需氮量均高于不施肥处理，大小依次呈现为 T4 ＞T3 ＞T2，其中 T4 氮总吸收量和每 100 kg 籽粒需氮量分别较 T2 增加 12.1%和 9.8%。T3 和 T4 氮肥偏生产力、氮肥利用率和氮肥农学利用率较 T2 平均高出 2.7%、18.4%和 8.0%，且 T4 氮肥利用率较 T3 显著高出 16.6%。说明 T4 增加蘖肥比例的氮钾养分优化运筹技术，能更有效吻合超级稻早稻的吸肥规律，促进氮素吸收利用。

表 2　不同施肥处理下水稻成熟期生物量($\bar{x}\pm s$)

Table 2　Biomass of rice at mature stage under different fertilization treatments　kg · hm^{-2}

处理 Treatment	稻谷产量 Grain yield	稻草产量 Rice straw yield	总生物量 Total Biomass
T1	5 263±263 c	4 756±133 c	8 768±209 c
T2	8 026±395 b	9 411±204 b	15 049±751 b
T3	8 114±362 b	9 485±70 b	15 181±377 b
T4	8 377±463 a	9 751±120 a	15 562±113 4 a

注：不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in different treatments mean significant difference($P<0.05$). The same below.

表 3　不同施肥处理下水稻氮素吸收利用($\bar{x}\pm s$)

Table 3　Absorption and utilization of N in rice under different fertilization treatments

处理 Treatment	氮总吸收量/(kg · hm^{-2}) TNA	每 100 kg 籽粒需氮量/kg NAPG	氮肥偏生产力/(kg · kg^{-1}) NPFP	氮肥利用率/ % NRE	氮肥农学利用率/ % NAE
T1	92±9 b	1.74±0.12 a	0	0	0
T2	157±21 a	1.94±0.35 a	53.51±2.63 a	33.26±1.35 b	18.42±2.63 a
T3	162±12 a	2.02±0.10 a	54.09±4.41 a	36.37±2.39 b	19.01±4.41 a
T4	176±5 a	2.13±0.34 a	55.84±7.09 a	42.41±2.73 a	20.76±7.09 a

2.2.2　磷素吸收利用　由表 4 可知，施肥处理磷总吸收量显著高于不施肥处理，大小依次呈现为 T4＞T3＞T2，其中 T3 和 T4 磷总吸收量较 T2 平均增加 11.1%。T4 水稻每 100 kg 籽粒需磷量较 T2 和 T3 分别增加 18.2%和 14.7%。T3 和 T4 磷肥偏生产力、磷肥利用率和磷肥利用率较 T2 平均高出 2.7%、36.8%和 7.9%，且 T4 磷肥农学利用率较 T3 显著高出 63.5%。说明增加蘖肥比例的氮钾养分优化运筹技术，能更有效吻合超级早稻的吸肥规律，间接促进磷素吸收利用。

2.2.3　钾素吸收利用　由表 5 可知，施肥处理钾总吸收量和每 100 kg 籽粒需钾量均高于不施肥处理，大小依次呈现为 T4 ＞ T3 ＞ T2，其中 T3 和 T4 钾总吸收量和每 100 kg 籽粒需钾量平均较

表 4　不同施肥处理下水稻磷素吸收利用($\bar{x}\pm s$)

Table 4　Absorption and utilization of P in rice under different fertilization treatments

处理 Treatment	磷总吸收量/(kg · hm^{-2}) TPA	每 100 kg 籽粒需磷量/kg PAPG	磷肥偏生产力/(kg · kg^{-1}) PPFP	磷肥利用率/% PRE	磷肥农学利用率/% PAE
T1	19±2 a	0.35±0.03 a	0	0	0
T2	27±3 b	0.33±0.07 a	89.18±4.39 a	7.08±0.65 a	30.70±4.39 a
T3	27±5 b	0.34±0.08 a	90.16±7.36 a	7.35±0.98 a	31.67±7.36 a
T4	33±4 b	0.39±0.02 a	93.07±11.81 a	12.02±1.09 b	34.60±11.81 a

表 5　不同施肥处理下水稻钾素吸收利用($\bar{x}\pm s$)

Table 5　Absorption and utilization of K in rice under different fertilization treatments

处理 Treatment	钾总吸收量/(kg · hm^{-2}) TKA	每 100 kg 籽粒需钾量/ kg KAPG	钾肥偏生产力/(kg · kg^{-1}) KPFP	钾肥利用率/% KRE	钾肥农学利用率/% KAE
T1	147±5 a	2.76±0.08 a	0	0	0
T2	244±29 b	3.04±0.59 a	66.89±3.29 a	52.96±3.88 b	23.02±3.29 a
T3	249±39 b	3.11±0.58 a	67.61±5.52 a	55.89±3.45 b	23.76±5.52 a
T4	262±26 b	3.15±0.43 a	69.81±8.86 a	64.67±2.58 a	25.95±8.86 a

T2 增加 4.7%和 3.0%。T3 和 T4 钾肥偏生产力、钾肥利用率和钾肥农学利用率较 T2 平均高出 2.7%、13.8%和 8.0%，且 T4 钾肥利用率较 T3 显著高出 15.7%。说明 T4 增加蘖肥比例的

氮钾养分优化运筹技术，更能有效吻合超级稻早稻的吸肥规律，促进钾素吸收利用。

2.3 不同施肥处理水稻干物质积累量

由图 1 可以看出，早稻移栽后，随着生长发育的进行，早稻干物质积累量持续上升，不施肥处理下早稻干物质积累量上升趋势相对平缓。施肥处理中，T2 早稻干物质积累量约在第 38 天之前，高于 T3、T4；第 38 天～第 68 天，T3 早稻干物质积累量开始超过 T2、T4；第 68 天，T4 与 T3 早稻干物质积累量相当，之后与 T2、T3 差异趋大。到完熟期，差异最大。完熟期早稻干物质积累量大小依次为 T4＞T3＞T2，T4 较 T2、T3 增加 11.8% 和 8.8%。说明 T4 增加蘖肥比例的氮钾运筹施肥方式，对超级早稻的生长发育总体表现一定的优势，能有效促进水稻干物质的累积。

2.4 不同施肥处理对水稻养分累积量和土壤养分质量分数的影响

2.4.1 对水稻氮素累积量和土壤碱解氮质量分数的影响 由图 2 可知，早稻需氮高峰在分蘖盛期(1～31 d)和成熟期(60～90 d)，土壤氮素供应出现 2 个高峰：早稻移栽后的第 1 天到第 31 天和第 46 天到第 75 天，且前者供应峰值更高。第 1 个土壤氮素供应高峰期内，第 15 天到第 31 天 T2 早稻氮素累积量高于 T3、T4。第 31 天到第 46 天 T4 早稻氮素累积量开始高于 T2、T3，其中 T4 显著高于 T2。第 2 个土壤氮素供应高峰期内，第

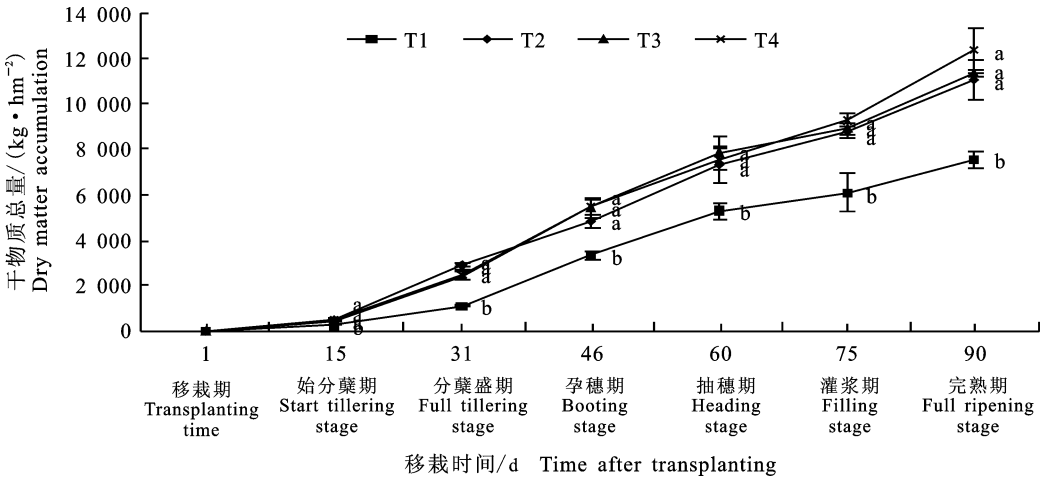
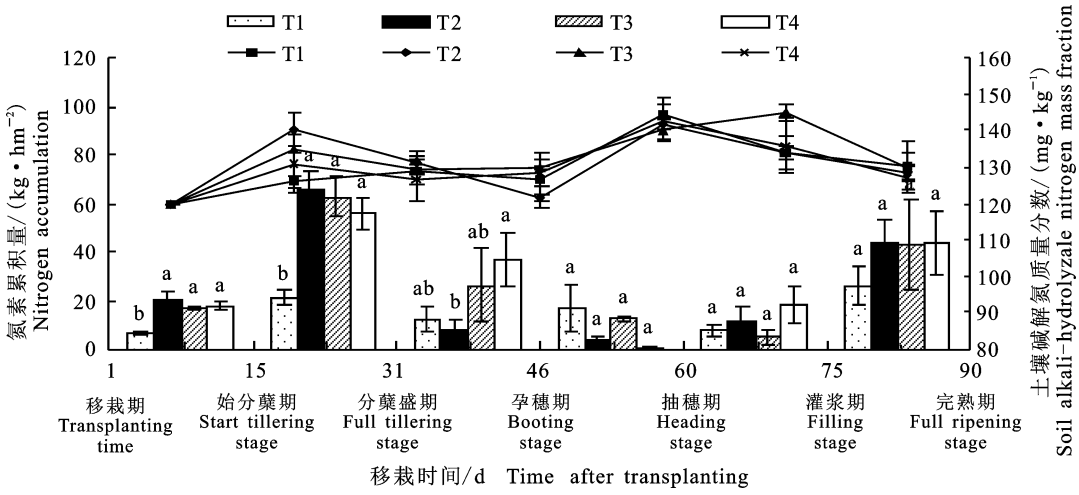


图 1 不同施肥处理下水稻干物质积累量的动态变化

Fig. 1 Dynamic changes of dry matter accumulation under different fertilization treatments



柱形图为累积量 Column shows accumulation；折线图为质量分数 Line shows mass fraction；下同 The same below

图 2 不同施肥处理下早稻氮素累积量和土壤碱解氮质量分数的变化

Fig. 2 Changes of nitrogen accumulation and soil alkali-hydrolyzale nitrogen mass fraction under different fertilization treatments

60 天至第 70 天，第 75 天至第 90 天早稻氮素累积量大小依次为 T4＞T2＞T3。表明不同氮钾运筹方式会影响土壤氮素的供应特性，从而影响早稻对氮素的吸收和累积，最终影响籽粒产量的形成。

2.4.2　对水稻磷素累积量和土壤有效磷质量分数的影响　由图 3 可知，早稻整个生育期内需磷高峰在移栽后的第 1 天到第 60 天和第 75 天到第 90 天，而土壤磷素供应高峰主要在第 1 天到第 60 天，其他时期较为平缓。第 1 天到第 31 天和第 46 天到第 60 天 T2 早稻磷素累积量高于 T3、T4。第 31 天到第 46 天，T4 早稻磷素累积量显著高于 T2。且 T4 早稻磷素累积量一直高于 T3（60～75 d 除外）。到完熟期，T4 早稻磷素累积量显著高于其他处理，大小依次为 T4 ＞ T2 ＞ T3。表明不同氮钾运筹方式会影响土壤磷素供应特性和早稻的吸收特性，从而影响早稻对磷素的吸收和累积，最终影响籽粒产量形成。

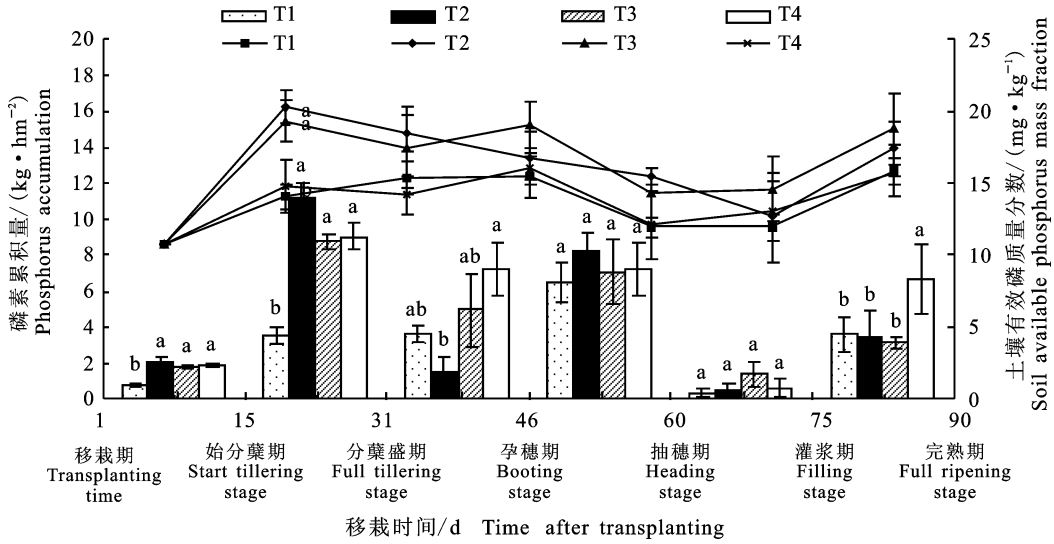


图 3　不同施肥处理下早稻磷累积量和土壤有效磷质量分数的变化

Fig. 3　Changes of phosphorus accumulation and available phosphorus mass fraction in soil under different fertilization treatments

2.4.3　对水稻钾素累积量和土壤速效钾质量分数的影响　由图 4 可知，早稻对钾素的需求具有持续性，需求高峰期主要在第 15 天到第 46 天（分蘖盛期）和第 60 天到第 75 天（抽穗期和乳熟期），而土壤钾素供应主要集中在第 15 天到第 31 天（分蘖期），后期供应相对不足，尤其在第 60 天到第 75 天（灌浆期和乳熟期）需要补充。第 1 天到第 31 天，T2 早稻钾素累积量高于 T3、T4。第 31 到第 46 天，T3、T4 早稻钾素累积量开始高于 T2，其中 T4 显著高于 T2。第 46 天到第 60 天和第 60 天到第 75 天，T3 早稻钾素累积量高于 T4。到完熟期，早稻钾素累积量大小依次为 T2＞T4＞T3。表明不同氮钾运筹方式会影响土壤钾素供应特征和水稻的吸收累积特性，从而影响早稻对钾素的吸收和累积，最终影响籽粒产量形成。

3　讨论

氮肥大量一次性施用会加速氨挥发，造成氮损失，因此在施肥量一致的情况下，适量氮肥后移有利于提高水稻生长后期氮素的吸收和积累[27-28]。随着氮肥用量的增加，作物产量也随之提升，稻田土壤中原存的钾素被大量带走，土壤中钾素缺失已成为南方稻田产量提升的限制因素之一[29]。相关研究表明，土壤中施入的钾肥 35%～45%被当季的水稻所吸收，另外 55%～65%被渗漏损失或者土壤固定[30]，因此适量、分次追施钾肥是可取的。Hong 等[31]研究认为，钾素吸收不仅促进水稻碳氮代谢、加速植物体内氮化合物的运输和稳定蛋白质的合成，也有利于水稻体内有机物质的转化和累积及促进氮、磷吸收。可能是氮、磷、钾养分在植株体内有机物的形成和转化过程中存在交互作用[32]。严莲英等[33]和王强盛[34]研究发现，钾肥后移处理养分含量较钾肥一次性施用处理养分含量增高，且氮肥基追施比例 4∶2∶3∶1，磷肥全部做基肥，钾肥基追施比例4∶4.5∶1.5时，超高产水稻产量最佳。也有

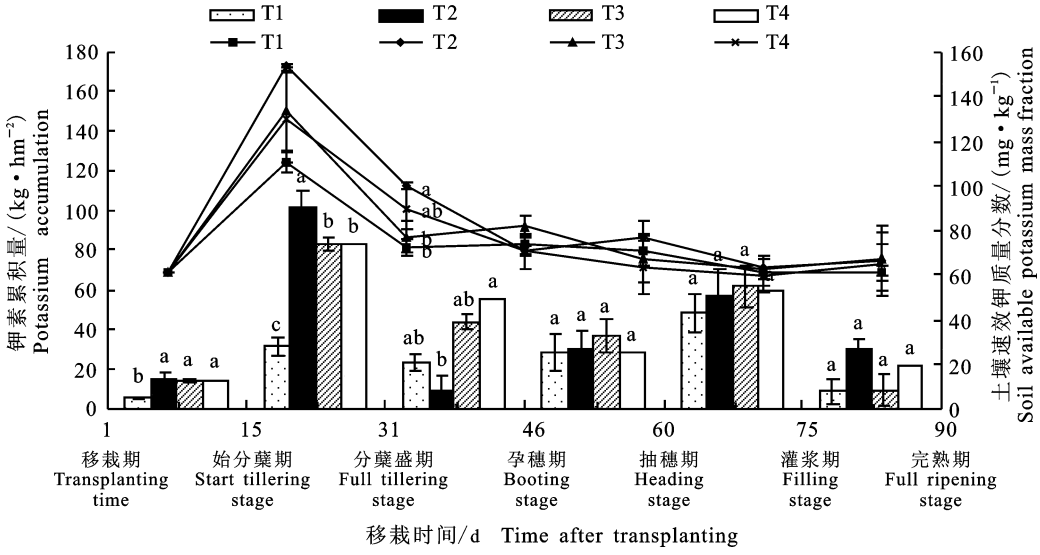


图 4 不同施肥处理下早稻钾累积量和土壤速效钾质量分数的变化

Fig. 4 Changes of potassium accumulation and available potassium mass fraction in soil under different fertilization treatments

研究表明,氮钾肥基追比为基∶蘖∶穗=5∶3∶2更符合超级稻晚稻吸肥规律[35]。T3、T4 是在相同氮素运筹且磷素一次性施用情况下,调整钾肥的追施比例,表明在对氮素运筹的同时,适当增加钾素运筹能促进植株更有效地吸收肥料和土壤供给的养分,从而增加超级稻的产量和肥料利用率。

3.1 氮钾运筹对超级早稻产量和养分吸收利用效率的影响

本研究结果表明,T3 和 T4 稻谷产量、总生物量比 T2 平均增加 2.7%和 2.1%。表明氮钾的适度后移更有利于早稻对养分的吸收累积,这与张雪凌等[36]研究结果一致。T4 早稻产量依次高于 T3、T2,这可能是由于 T4 氮钾运筹模式更符合早稻生长发育的关键时期需求。T4 氮磷钾养分吸收总量、每 100 kg 籽粒需氮磷钾量、偏生产力、氮磷钾肥吸收利用率和氮磷钾肥农学利用率均依次高于 T3、T2。表明适当调整氮钾素的后移量不仅能提高氮钾素吸收利用,同时影响早稻对磷的吸收,提高磷素吸收利用,减少稻田氮磷流失,降低农业面源污染[37]。

3.2 氮钾运筹对超级早稻养分需求特征和土壤养分供应的影响

本研究中,T2 早稻干物质总量在生长发育后期低于 T3 和 T4。表明合理的氮钾运筹能在后期持续供应养分,促进早稻后期的生长发育,其中 T4 高于 T3。而磷肥是一次性施入的,这不仅说明氮、磷、钾肥之间在一定程度上相互促进吸收,而且这种促进效果的大小是建立在作物摄取养分平衡的基础上[38-41]。早稻移栽孕穗期至灌浆期需氮量相对较少,而土壤碱解氮累积较多,且灌浆期后氮素足量的供应是水稻产量的保证。其中 T4 在成熟期氮素累积量高于 T2 和 T3。表明 T4 氮素运筹比例后期能更好促进植株吸收土壤中的有效态氮,更切合早稻对氮素的需求。灌浆期后,T4 磷素累积量高于 T2 和 T3,而土壤有效磷质量分数低于 T2 和 T3,说明 T4 氮钾运筹方式在促进水稻植株生长发育的同时,也增加植株对土壤有效磷的吸收,较 T3 更为科学。而 T3 在钾素需求高峰期略有盈余,灌浆期之后却供应不足,相对钾素运筹不一致的 T4,前者的产量、氮磷钾利用效率、氮磷钾累积量等低于后者,有的甚至达到显著水平。说明氮、磷、钾养分运筹要同步,而且不同时期的施用量一定要均衡。T2 收获期土壤速效钾较 T3 和 T4 出现盈余,水稻植株钾素积累量较少,这可能与 T2 钾肥分次施用有关。本研究中,氮肥基追比为基∶蘖∶穗=6∶2∶2,钾肥基追比为基∶蘖∶穗=5∶3∶2 的 T4 能较好满足超级早稻对养分需求的运筹模式,将其运用到实际生产中,指导施肥或者通过缓控释材料的选择,促使肥料养分的释放更接近植株养分的吸收,提高肥料的利用效率。

4 结 论

T4 处理(氮肥基追比为基∶蘖∶穗

＝6∶2∶2，钾肥基追比为基∶蘖∶穗＝5∶3∶2）和 T3 处理（氮钾肥基追比为基∶蘖∶穗＝6∶2∶2）的施肥模式下超级早稻产量及氮、磷、钾养分利用效率均高于 T2 处理（氮钾肥基追比为基∶蘖＝3∶2），且 T4 处理更优于 T3 处理。表明 T4 处理的氮钾运筹对超级早稻的产量、养分质量分数相对具有良好的提升作用，其氮钾养分运筹特征与相应土壤的供肥特征更吻合早稻的养分需求特性。

参考文献　Reference：

[1] 王玉雯，郭九信，孔亚丽，等. 氮肥优化管理协同实现水稻高产和氮肥高效[J]. 植物营养与肥料学报，2016，22(5)：1157-1166.
WANG Y W，GUO J X，KONG Y L，*et al*. Nitrogen optimize management achieves high grain yield and enhances nitrogen use efficiency of rice[J]. *Journal of Plant Nutrition & Fertilizer*，2016，22(5)：1157-1166.

[2] 赵　营，同延安，张树兰，等. 氮磷钾施用量对灌淤土水稻产量及肥料利用率的影响[J]. 西北农业学报，2010，19(2)：118-121.
ZHAO Y，TONG Y A，ZHANG SH L，*et al*. Effect of different N，P_2O_5，K_2O rates on yield and fertilizer using efficiency of paddy rice in irrigation-warping soil of Ningxia [J]. *Acta Agriculture Boreali-occidentalis Sinica*，2010，19(2)：118-121.

[3] 巨晓棠，谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. 植物营养与肥料学报，2014，20(4)：783-795.
JU X T，GU B J. Status-quo，problem and trend of nitrogen fertilization in China[J]. *Journal of Plant Nutrition & Fertilizer*，2014，20(4)：783-795.

[4] 王玲玲，董春华，罗尊长，等. 湘东稻－油轮作区氮磷利用效率对化肥减施的响应[J]. 核农学报，2018，32(2)：353-361.
WANG L L，DONG CH H，LUO Z CH，*et al*. Response of the field utilization efficiency of nitrogen and phosphorus to the reduction in chemical fertilizer's application on rice-rape rotation area in eastern Hunan[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*，2018，32(2)：353-361.

[5] 陈晓群，孙玉芳，赵　营，等. 不同 N、P 肥配比对水稻产量、养分吸收及稻田水环境的影响[J]. 西北农业学报，2010，19(7)：173-180.
CHEN X Q，SUN Y F，ZHAO Y，*et al*. Effect of different N and P rates on the rice yield，nutrients uptake and water environment of paddy field[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*，2010，19(7)：173-180.

[6] 陈　贵，赵国华，张红梅，等. 长期施用有机肥对水稻产量和氮磷养分利用效率的影响[J]. 中国土壤与肥料，2017(1)：92-97.
CHEN G，ZHAO G H，ZHANG H M，*et al*. Effect of long-term organic fertilizers application on rice yield，nitrogen and phosphorus use efficiency[J]. *Soil & Fertilizer Sciences in China*，2017(1)：92-97.

[7] WAH A，SUTTON M A，SCHJORRING J K. Ammonia：emission，atmospheric transport and deposition[J]. *New Phytologist*，1998，139(1)：27-48.

[8] 郭明明，赵广才，郭文善，等. 追氮时期和施钾量对小麦氮素吸收运转的调控[J]. 植物营养与肥料学报，2016，22(3)：590-597.
GUO M M，ZHAO G C，GUO W SH，*et al*. Regulation of nitrogen topdressing stage and potassium fertilizer rate on absorption and translocation of nitrogen by wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition & Fertilizer*，2016，22(3)：590-597.

[9] 朱方旭，郭雪冬，同拉嘎，等. 蘖穗氮肥追施比例对水稻灌浆成熟期 Rubisco 和 GS 同工型基因表达量的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2017，23(2)：324-332.
ZHU F X，GUO X D，TONG L G，*et al*. Expression response of Rubisco and GS isoform gene to the ratio of tillering and heading nitrogen fertilization at rice filling stage [J]. *Journal of Plant Nutrition & Fertilizer*，2017，23(2)：324-332.

[10] 刘晓伟，王火焰，朱德进，等. 氮肥施用方式对水稻产量以及氮、磷、钾养分吸收利用的影响[J]. 南京农业大学学报，2017，40(2)：203-210.
LIU X W，WANG H Y，ZHU D J，*et al*. Effect of N fertilization method on rice yield and N，P and K uptake and use efficiency[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*，2017，40(2)：203-210.

[11] 才　硕，潘晓华，吴建富，等. 施钾量对超高产早稻品种产量和稻米品质的影响[J]. 江西农业学报，2011，23(5)：1-5.
CAI SH，PAN X H，WU J F，*et al*. Effects of potassium application rate on yield and quality of superhigh-yielding early rice varieties[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*，2011，23(5)：1-5.

[12] 郑圣先，聂　军，熊金英，等. 控释肥料提高氮素利用率的作用及对水稻效应的研究[J]. 植物营养与肥料学报，2001，7(1)：11-16.
ZHENG SH X，NIE J，XIONG J Y，*et al*. Study on role of controlled release fertilizer in increasing the efficiency of nitrogen utilization and rice yield[J]. *Plant Natrition & Fertilizen Science*，2001，7(1)：11-16.

[13] 侯红乾，黄永兰，冀建华，等. 缓/控释肥对双季稻产量和氮素利用率的影响[J]. 中国水稻科学，2016，30(4)：389-396.
HOU H Q，HUANG Y L，JI J H，*et al*. Effects of controlled-release fertilizer application on double cropping rice yield and nitrogen use efficiency[J]. *Chinese Journal of Rice Science*，2016，30(4)：389-396.

[14] 徐明岗，李菊梅，李冬初，等. 控释氮肥对双季水稻生长及氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2009，15(5)：1010-1015.
XU M G，LI J M，LI D CH，*et al*. Effect of controlled-re-

lease nitrogen fertilizer on growth and fertilizer nitrogen use efficiency of double rice in southern China[J]. *Plant Nutrition & Fertilizer Science*,2009,15(5):1010-1015.

[15] 蒋 琪,许国春,王强盛,等.氮素穗肥对超级稻颖果发育及经济性状的影响[J].南京农业大学学报,2016,39(2):191-197.
JIANG Q,XU G CH,WANG Q SH,*et al*. Effects of panicle N fertilizer on caryopsis development and economic characters of super rice[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*,2016,39(2):191-197.

[16] SINGH S K,BHATI P K,SHARMA A,*et al*. Super hybrid rice in China and India:current status and future prospects[J]. *International Journal of Agriculture & Biology*,2015,17(2):222-232.

[17] PAMPOLINO M F,MANGUIAT I J,RAMANATHAN S,*et al*. Environmental impact and economic benefits of site-specific nutrient management (SSNM) in irrigated rice systems[J]. *Agricultural Systems*,2007,93(1):1-24.

[18] 杜昌文,周健民.控释肥料的研制及其进展[J].土壤,2002,34(3):127-133.
DU CH W,ZHOU J M. Development and progress of controlled release fertilizer[J]. *Soil*,2002,34(3):127-133.

[19] 魏海燕,李宏亮,程金秋,等.缓释肥类型与运筹对不同穗型水稻产量的影响[J].作物学报,2017,43(5):730-740.
WEI H Y,LI H L,CHENG J Q,*et al*. Effects of slow release fertilizer types and their application regime on yield in rice with different types of panicle[J]. *Acta Agronomica Sinica*,2017,43(5):730-740.

[20] 陈建生,徐培智,唐拴虎,等.一次基施水稻控释肥技术的养分利用率及增产效果[J].应用生态学报,2005,16(10):1868-1871.
CHEN J SH,XU P ZH,TANG SH H,*et al*. Nutrient use efficiency and yield-increasing effect of single basal application of rice specific controlled release fertilizer[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*,2005,16(10):1868-1871.

[21] 邢晓鸣,李小春,丁艳锋,等.缓控释肥组配对机插常规粳稻群体物质生产和产量的影响[J].中国农业科学,2015,48(24):4892-4902.
XING X M,LI X CH,DING Y F,*et al*. Effects of types of controlled released nitrogen and fertilization modes on yield and dry mass production[J]. *Scientia Agricultura Sinica*,2015,48(24):4892-4902.

[22] YANG Y,ZHANG M,LI Y C,*et al*. Controlled release urea improved nitrogen use efficiency,activities of leaf enzymes,and rice yield[J]. *Soil Science Society of America Journal*,2012,76(6):2307-2317.

[23] 黄巧义,唐拴虎,张发宝,等.减氮配施控释尿素对水稻产量和氮肥利用的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(6):829-838.
HUANG Q Y,TANG SH H,ZHANG F B,*et al*. Effect of combined application of controlled-release urea and conventional urea under reduced N rate on yield and N utilization efficiency of rice[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*,2017,25(6):829-838.

[24] 李 玥,李应洪,赵建红,等.缓控释氮肥对机插稻氮素利用特征及产量的影响[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2015,41(6):673-684.
LI Y,LI Y H,ZHAO J H,*et al*. Effects of slow-and controlled-release nitrogen fertilizer on nitrogen utilization characteristics and yield of machine-transplanted rice[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*,2015,41(6):673-684.

[25] 张玉屏,曹卫星,朱德峰,等.红壤稻田钾肥施用量对超级稻生长及产量的影响[J].中国水稻科学,2009,23(6):633-638.
ZHANG Y P,CAO W X,ZHU D F,*et al*. Effects of potassium fertilizer rate on growth and yield formation of super high yielding rice in red paddy soil[J]. *Chinese Journal of Rice Science*,2009,23(6):633-638.

[26] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
LU R K. Analysis Method of Soil and Agrochemistry[M]. Beijing:China Agricultural Scientech Press,2000.

[27] 赵庆勇,朱 镇,张亚东,等.播期、密度和施氮量对南粳44产量及其构成因素的影响[J].西南农业学报,2012,25(6):1982-1987.
ZHAO Q Y,ZHU ZH,ZHANG Y D,*et al*. Effects of different sowing time,planting density and nitrogen fertilizing on yield and its components of Nanjing 44[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*,2012,25(6):1982-1987.

[28] 蒋 鹏,黄 敏,Md. Ibrahim,等."三定"栽培对双季超级稻养分吸收积累及氮肥利用率的影响[J].作物学报,2011,37(12):2194-2207.
JIANG P,HUANG M,MDIBRAHIM,*et al*. Effects of "Sanding" cultivation method on nutrient uptake and nitrogen use efficiency in double cropping super rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*,2011,37(12):2194-2207.

[29] 张洋洋,鲁剑巍,王友珠,等.钾肥施用方式对直播和移栽水稻产量和钾肥利用效率的影响[J].作物杂志,2016(1):110-114.
ZHANG Y Y,LU J W,WANG Y ZH,*et al*. Effects of potassium fertilizer application method on yield and potassium apparent efficiency of direct-sowing rice and transplanting rice[J]. *Crops*,2016(1):110-114.

[30] 王家玉.杂交水稻钾素营养特性与有效施钾技术[J].杂交水稻,1993(1):21-26.
WANG J Y. Charateristics of potassium nutrition in hybrid rice and available potassium application techniques[J]. *Hybrid Rice*,1993(1):21-26.

[31] HONG H U,WANG G H. Nature of nitrogen and phosphorus uptake by a hybrid rice under the potassium fertilizer treatment[J]. *Chinese Journal of Soil Science*,2003,34(3):202-204.

[32] 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，transformation and yield of summer maize[J]. *Plant Nutrition & Fertilizer Science*，2006，12(5)：622-627.

[33] 严莲英，秦　松，杨桂兰，等. 氮、钾肥后移施用对超高产水稻产量及其构成因素和养分含量的影响[J]. 西南农业学报，2016，29(1)：103-108.
YAN L Y，QIN S，YANG G L，*et al*. Effects of postponing nitrogen and potassium application on yield，yield components and nutrient content of super high-yielding rice[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*，2016，29(1)：103-108.

[34] 王强盛. 水稻钾素营养的积累特征及生理效应[D]. 南京：南京农业大学，2009：93-95.
WANG Q SH. Rice accumulation and physiological effects of potassium nutrition[D]. Nanjing：Nanjing Agricultural University，2009：93-95.

[35] 谢　宜，罗尊长，董春华，等. 超级稻晚稻氮磷钾养分需求特征研究[J]. 华北农学报，2018，33(1)：176-184.
XIE Y，LUO Z CH，DONG CH H，*et al*. Study on characteristics of nitrogen，phosphorus and potassium demanded in super hybrid late rice[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*，2018，33(1)：176-184.

[36] 张雪凌，姜慧敏，刘　晓，等. 优化氮肥用量和基追比例提高红壤性水稻土肥力和双季稻氮素的农学效应[J]. 植物营养与肥料学报，2017，23(2)：351-359.
ZHANG X L，JIANG H M，LIU X，*et al*. Optimization of nitrogen rate and base and topdressing ratio to improve agronomic soil fertility and use efficiency of nitrogen in rice [J]. *Journal of Plant Nutrition & Fertilizer*，2017，23(2)：351-359.

[37] LI K，SIMA X F，DING SH Q，*et al*. Effects of controlled release fertilizer on loss of nitrogen and phosphorus from farmland[J]. *Agricultural Science & Technology*，2012(8)：113-118.

[38] 彭少兵，黄见良，钟旭华，等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]. 中国农业科学，2002，35(9)：1095-1103.
PENG SH B，HUANG J L，ZHONG X H，*et al*. Research strategy in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*，2002，35(9)：1095-1103.

[39] 杨　林，李书华，李　霞，等. 不同氮磷钾配施对芦笋生长和产量的影响[J]. 农学学报，2017，7(2)：48-54.
YANG L，LI SH H，LI X，*et al*. Effect of different nitrogen，phosphorus and potassium treatments on growth and yield of *Asparagus officinalis*[J]. *Journal of Agriculture*，2017，7(2)：48-54.

[40] 胡铁军，陆军良，陈　帅. 氮磷钾平衡施用对杂交水稻甬优15产量和肥料利用率的影响[J]. 浙江农业科学，2014，1(2)：162-163.
HU T J，LU J L，CHEN SH. Effect of balanced application of N，P and K on yield and fertilizer utilization of hybrid rice Yongyou 15[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*，2014，1(2)：162-163.

[41] 田智慧，潘晓华，吴建富. 中优752的氮、钾吸肥特性研究[J]. 江西农业大学学报，2006，28(5)：651-653.
TIAN ZH H，PAN X H，WU J F. Characters of nitrogen and potassium uptake of Zhongyou 752[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*，2006，28(5)：651-653.

Study on Characteristics of Nitrogen, Phosphorus and Potassium Demand in Super Early Rice

XIE Yi[1,2], ZHOU Xuan[2], LUO Zunchang[1,2], WANG Lingling[1,2], HU Kexin[1,2], ZHOU Mengyu[3] and DONG Chunhua[2]

(1. Longping Branch, Graduate School, Hunan University, Changsha 410125, China; 2. Hunan Institute of Soil and Fertilizer, Changsha 410125, China; 3. Agricultural Comprehensive Service Station of Dahu Town, Liuyang City, Hunan Province, Liuyang Hunan 410305, China)

Abstract In order to efficiently improve yield and fertilizer utilization efficiency of super early rice and guide the development of new fertilizers (slow/controlled release fertilizer, etc.), the characteristics of nutrient demand and soil nutrient of super early rice were studied by combined application of N and K under the condition of optimal operation, and then the difference between yield and N, P, K utilization was found. The results showed that compared with T2 (N-base : tillering = 3 : 2, K-base : tillering = 3 : 2), optimal fertilization (T3 and T4) of N and K increased yield, N, P, K utilization efficiency and dry matter accumulation of early rice. Grain yield and N, P, K utilization efficiency in T4 (N-base : tillering : panicle = 6 : 2 : 2, K-base : tillering : panicle = 5 : 3 : 2) were the highest, and compared with T3(N-base : tillering : panicle = 6 : 2 : 2, K-base : tillering : panicle = 6 : 2 : 2), grain yield, dry matter accumulation, and N, P, K accumulation increased by 3.2%, 8.8%, respectively, N, P, K utilization efficiency increased by 16.6%, 63.5%, 15.7%, respectively. The N, P, K accumulation characteristics of early rice and the corresponding supply characteristics of soil nutrient in T4 were consistent with the nutrient requirement characteristics of super early rice. This study has provided practical basis for the development of corresponding new fertilizers (slow/controlled release fertilizer, etc.) to reduce fertilizer, increase efficiency in super early rice.

Key words Super early rice; Characteristics of nutrition demand; Yield; Utilization efficiency

Received 2018-07-18 **Returned** 2018-09-21

Foundation item National Key Research and Development Program of China's 13th Five-year Plan (No. 2016YFD0200809); National Key and Technology R&D Program of China(No. 2015BAD23B03).

First author XIE Yi, female, master student. Research area: plant nutrition and fertilization. E-mail: 792768789@qq.com

Corresponding author DONG Chunhua, male, associate research fellow. Research area: plant nutrition and fertilization. E-mail: dch1001@126.com

(责任编辑:史亚歌 **Responsible editor: SHI Yage**)