

水稻秸秆养分垂直分布特征与不同留茬高度下还田养分估算

顾克军, 张传辉, 顾东祥, 张斯梅, 石祖梁, 许博, 杨四军

(江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏省农业科学院循环农业研究中心, 江苏 南京 210014)

摘要: 为了明确水稻植株不同层次的秸秆养分特征, 科学估算不同留茬高度下稻秆养分还田量, 通过在成熟期采集江苏省生产上主推的水稻品种植株, 用分层切断法, 将秸秆从基部向上依次截取 5 段长度为 5 cm 的秸秆, 剩余部分为第 6 段 (分别用 0~5、5~10、10~15、15~20、20~25 和 >25 cm 表示 6 段秸秆), 对穗部单独进行脱粒处理获取穗轴与枝梗, 对植株各部分秸秆分别进行烘干称重, 并进行养分分析。结果表明: 在植株基部 0~25 cm 范围内 5 个层次秸秆干重占植株秸秆干重的比例都表现为随基部向上依次减少的趋势。水稻秸秆 N 与 P 含量呈现出从冠层向下递增的趋势, 而秸秆 K 含量则表现出从冠层向下递减的趋势。江苏省水稻秸秆 N、P 和 K 养分总量分别为 16.16×10^4 、 2.81×10^4 和 30.21×10^4 t, 不同留茬高度秸秆养分还田量不同, 留茬高度为 15 cm 时, 水稻秸秆 N、P 和 K 养分还田量分别为 6.02×10^4 、 1.43×10^4 和 6.78×10^4 t。不同稻区秸秆还田时应根据留茬高度及稻谷产量水平进行估算秸秆养分还田量, 同时结合其它条件科学制定肥料运筹策略。

关键词: 水稻; 秸秆养分; 留茬高度; 秸秆还田

中图分类号: Q945.3; S511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-6257 (2017) 03-0099-06

中国每年的秸秆资源总量已达 8×10^8 t 左右, 秸秆中富含多种营养元素, 仅 2006 年中国作物秸秆中 N、P 和 K 养分含量就分别达 776×10^4 、 249×10^4 和 1342×10^4 t^[1-2]。秸秆还田是秸秆综合利用的重要途径之一, 可以较好地归还作物秸秆中的养分, 同时具有改善土壤理化性状、部分替代化学肥料和增加作物产量等诸多作用^[3-6]。明确不同尺度范围内秸秆还田量及其养分归还量对于作物养分管理具有重要意义。对作物秸秆养分的估算通常以整株作物为对象, 得出不同种类作物秸秆的养分平均含量^[7-10], 这对于秸秆全量还田条件下的养分估算具有重要的参考价值。但由于作物秸秆的用途存在多样性, 不同地区作物收获方式也不相同, 因此机械收获留茬高度也不一致。此外, 作物秸秆中同器官或不同层次的干物质积累与养分含量也有明显不同^[11-13], 作物的叶、茎、鞘及其养分是非均匀地分布在植株整个空间, 因而收割后残茬干物质及其

养分必然与留茬高度呈非线性关系。因此留茬高度决定了秸秆还田量, 也同时决定了秸秆养分的归还状况, 但由于缺乏空间不同层次秸秆养分含量的研究, 单纯通过秸秆还田量还难以对生产上不同留茬高度下秸秆养分还田量进行较好的估算。目前对不同留茬高度条件下秸秆还田养分归还量的估算研究还鲜见报道。

江苏省是我国典型的稻麦轮作区, 秸秆产生量大且还田比例高, 本文通过对成熟期江苏省水稻整株秸秆进行分层 (穗轴枝梗作为单独一部分) 测定其干物质量与养分含量, 以期科学评估江苏省乃至同类型地区不同留茬高度条件下秸秆还田量及其养分归还量提供依据, 同时对于指导接茬作物乃至隔茬作物的科学施肥, 减少养分流失风险和稳定提高稻麦产量也具有重要理论与现实意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2013 年 10 月底至 11 月初分别在江苏省金坛、扬中、盐都、睢宁、沭阳等 5 地采集当地稻麦科技综合展示基地品种展示区的代表性水稻品种 10 个, 分别为“武运粳 23 号”、“镇稻 11 号”、“南粳 5055”、“扬粳 4227”、“武运粳 24 号”、“南粳 49”、“武运粳 27 号”、“徐稻 5 号”、“连粳 6

收稿日期: 2016-08-01; 最后修订日期: 2016-11-09

基金项目: 江苏省重点研发 (社会发展) 项目 (BE2015673); 江苏省农业科技自主创新项目 [cx(12)1002]; 国家科技支撑项目 (2013BAD07B09); 国家公益性行业 (农业) 项目 (201503136-7)。

作者简介: 顾克军 (1972-), 男, 江苏建湖人, 硕士, 副研究员, 主要从事耕作与栽培、作物秸秆综合利用方面研究。E-mail: gkjaas@163.com。

号”和“宁粳4号”。

1.2 样品采集与测定

在水稻收割前1~3 d取样,每个品种随机选择1块田,每个田块面积不少于0.33 hm²,利用“S”型取样法对每个品种在田间随机取5个样点,每点取样面积为1 m²,将水稻连根挖起。取样后将水稻植株根部冲洗干净,剪去根部与穗部,将穗部单独置入尼龙网袋。使用铡刀从水稻植株基部向上依次截取5段长度为5 cm的秸秆,剩余部分为第6段(以下分别用0~5、5~10、10~15、15~20、20~25和>25 cm表示6段秸秆),分别装入尼龙网袋并移入实验室,80℃烘干至恒重,再对样品进行称重。对穗部进行进一步脱粒、烘干,分别称量籽粒和穗轴枝梗质量。

分别测定不同部位秸秆的氮、磷、钾的养分含量。氮含量采用半微量凯氏定氮法测定,磷含量用钼锑钨比色法测定,钾含量用火焰光度法测定^[14]。

文中水稻秸秆指除根系和籽粒外的水稻植株剩余部分,包括水稻的茎、鞘、叶片和穗轴枝梗;水稻籽粒与秸秆均烘干至恒重,计算不同部位秸秆干质量占秸秆总干质量的比例,以秸秆干基测定秸秆相关养分含量。每个水稻品种的相关指标值取该品种5个样点平均值,而文中所述每一部位指标值为10个水稻品种同一部位的平均值。本文计算江苏省2013年水稻秸秆养分归还量时,水稻籽粒单产及总产均来源于《江苏省农村统计年鉴》(2014)^[15]。本文将江苏省统计局资料中的稻谷含水率统一假定为14.0%,并以此为标准将所引用的稻谷产量折算为纯干重计算相关的草谷比和秸秆量,文中水稻籽粒不同产量对应的草谷比采用了江苏省农业科学院农业资源与环境研究所采样调查的数据结果^[16]。

1.3 数据处理与分析

采用Excel 2003和DPS 14.50软件进行数据处理与分析。

2 结果与分析

2.1 江苏省水稻秸秆资源总量

表1显示,江苏省2013年水稻总产1 765.03 × 10⁴ t,按照各地级市统计单产数据及不同单产的草谷比^[16],估算出相应地区水稻秸秆量,从而得出江苏省2013年水稻秸秆总量为1 756.22 × 10⁴ t。与

2009年相比^[16],水稻总产增加了214.55 × 10⁴ t,而水稻秸秆量仅增加了156.74 × 10⁴ t,这主要与水稻单产提高后草谷比下降有关。2009年江苏水稻平均单产在6 750~7 500 kg/hm²区间的比例占49.8%,该区间草谷比为1.06,平均单产在7 500~8 250 kg/hm²区间的比例占41.8%,该区间草谷比为0.98;而2013年江苏水稻平均单产在6 750~7 500 kg/hm²区间的比例为20.7%,平均单产在7 500~8 250 kg/hm²区间的比例占79.3%。因此,与2009年相比,2013年江苏省水稻籽粒总产增加较多,但秸秆增加比例低于总产增加比例。

表1 江苏省水稻秸秆资源总量(干质量)(2013)

地区	单产 (kg/hm ²)	总产 (万t)	草谷比	秸秆总量 (万t)
徐州	7 126.82	135.42	1.06	143.54
连云港	7 841.48	159.91	0.98	156.71
淮安	7 609.28	223.76	0.98	219.29
盐城	8 022.94	299.38	0.98	293.39
宿迁	7 425.24	158.69	1.06	168.21
南通	8 174.30	141.37	0.98	138.54
扬州	7 920.60	165.05	0.98	161.75
泰州	8 035.84	165.02	0.98	161.72
南京	7 490.60	70.73	1.06	74.97
无锡	7 841.48	42.49	0.98	41.64
常州	8 281.80	67.63	0.94	63.57
苏州	8 002.30	63.92	0.98	62.64
镇江	7 850.08	71.66	0.98	70.23
合计		1 765.03		1 756.22

2.2 水稻不同层次的秸秆分布

根据式(1)对水稻不同层次的秸秆占秸秆总量的比例进行估算。

$$R_i = W_i / W_g \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中,在单位收获面积内, W_i 为水稻成熟时稻株距茎基某一层级秸秆干质量, W_g 为水稻成熟时稻株总干质量, R_i 为水稻成熟时稻株距茎基某一层级秸秆干质量占稻株秸秆总干质量的比率。其中*i*=1~7,依次表示距稻株基部由近到远的不同秸秆层。公式中稻秸秆干质量不含籽粒与根系。根据式(1)计算,可得表2。

由表2可看出,秸秆单位长度干质量有随基部向上逐渐减少的趋势,其中距茎基25 cm以下部位占整株秸秆总量的36.4%。江苏省主推的水稻品种株高一般在100 cm左右,基部秸秆以较短的长度占了较大比例的秸秆量,其原因可能是与上部茎秆相比,基部茎秆较粗且茎壁较厚^[17-18]。在使用联

表2 水稻秸秆垂直分布特征

项目	植株部位						
	1	2	3	4	5	6	7
距茎基的距离 (cm)	0~5	5~10	10~15	15~20	20~25	>25	穗轴和枝梗
占比 (%)	9.18 ± 0.17 b	8.07 ± 0.16 c	6.52 ± 0.13 d	6.49 ± 0.05 d	6.16 ± 0.17 d	59.61 ± 0.53 a	3.97 ± 0.13 e

注：同行数据不同字母表示差异达到0.05显著水平。占比为10个水稻品种同一层次的平均值。

合收割机作业与秸秆收集打捆离田条件下，秸秆还田量随留茬高度增加而增加。根据水稻秸秆垂直空间上不同层次的分布比例，可以推算出不同留茬高度条件下水稻秸秆还田比例与可收集比例，如通常留茬高度在10~15 cm时，考虑到水稻穗轴和枝梗不可收集的因素，水稻秸秆还田比例为21.2%~27.7%，可收集比例为72.3%~78.8%。

2.3 水稻秸秆养分垂直分布特征

表3显示，水稻植株不同部位的秸秆养分含量具有明显的垂直梯度。秸秆N与P含量呈现出从冠层向下递增的趋势，其中距基部0~5 cm的秸秆N含量几乎是距基部20 cm以上秸秆与穗轴N含量的2倍，而距基部0~5 cm秸秆P含量则为距基部20 cm以上秸秆P含量的2.7倍，是穗轴P含量的2.3倍，都达到了显著差异。秸秆K含量则与秸秆N与P含量的梯度特征相反，表现出从冠层向下递减的趋势，距基部20~25 cm秸秆K含量是距基部0~5 cm秸秆K含量的2.2倍，穗轴K含量则为其2.7倍，也都达到了显著差异。上述结果表明，随着留茬高度增加（茬口以上部分收集离田）还田秸秆的N与P平均含量在下降，而秸秆的K平均含量在上升，表现为非线性变化特征。

表3 水稻不同部位秸秆的养分含量 (%)

部位	N	P	K
0~5	1.64 ± 0.06a	0.35 ± 0.03a	0.86 ± 0.05a
5~10	1.19 ± 0.06b	0.31 ± 0.03a	1.36 ± 0.10b
10~15	0.99 ± 0.05c	0.28 ± 0.03ab	1.63 ± 0.08c
15~20	0.90 ± 0.07cd	0.23 ± 0.03bc	1.76 ± 0.06cd
20~25	0.83 ± 0.07cd	0.13 ± 0.02d	1.88 ± 0.06d
穗轴	0.80 ± 0.07d	0.15 ± 0.03d	2.29 ± 0.17e
整株	0.92 ± 0.05cd	0.16 ± 0.02cd	1.72 ± 0.04cd

注：同列数据不同字母表示差异达到0.05显著水平。秸秆养分含量为10个品种同层次的平均值。

2.4 不同留茬高度秸秆养分还田量

依据公式(2)对不同留茬高度条件下稻秸养分还田量进行估算。

$$G_{xi} = G_s \times (\sum R_i C_{xi} + R_7 C_{x7}) \quad (2)$$

式(2)中， R_i 表示稻株不同部位秸秆占整个稻株秸秆总量的比率， C_{xi} 表示不同部位秸秆的养分含量，其中*x*表示N、P或K， R_7 表示穗轴枝梗占整个稻株秸秆总量的比率， C_{x7} 表示穗轴枝梗的N、P或K的含量， G_s 表示单位收获面积上的水稻秸秆总干质量。 G_{xi} 表示单位收获面积上不同留茬高度下水稻秸秆N、P或K养分资源总量，其中*i*=1~5，分别表示留茬5、10、15、20、25 cm，*i*=6表示秸秆全量还田。

根据江苏省水稻秸秆资源总量(表1)、不同层次秸秆量占全株的比例(表2)及其相应部位秸秆的养分含量(表3)，通过式(2)进行分层逐级累加，可分别估算出不同留茬高度条件下，江苏省水稻秸秆养分还田量(表4)。表4显示，江苏省水稻秸秆全量还田时，秸秆N、P和K养分还田量分别为： 16.16×10^4 、 2.81×10^4 和 30.21×10^4 t，其中以K含量最高，N含量次之，P含量最低。如果收割时留茬高度为15 cm，其它秸秆收集离田，考虑到机械收割条件下水稻穗轴与枝梗不易收集，江苏省水稻秸秆N、P和K养分还田量分别为 6.02×10^4 、 1.43×10^4 和 6.78×10^4 t。

表4 江苏省水稻秸秆不同还田方式秸秆养分归还量

留茬高度 (cm)	秸秆养分还田量 (t)		
	N	P	K
5	32 018.0	6 688.6	29 831.3
10	48 883.5	11 082.1	49 106.2
15	60 219.6	14 288.3	67 770.6
20	70 477.6	16 909.8	87 830.8
25	79 456.8	18 316.1	108 169.3
全量还田	161 572.2	28 099.5	302 069.8

3 讨论

作物养分在植株体内的分配格局受作物生长驱动，同时也是对外界环境条件的一种适应^[19]。有

研究显示,作物冠层生物量和养分含量都具有一定的垂直分布梯度^[20-22],同时作物秸秆中养分含量还受栽培措施等的影响,如氮肥过量供应将使养分过多地滞留于茎鞘和叶片^[23]。李迪秦等^[24]通过对不同水稻品种及其播期的研究,结果显示,水稻群体各个高度层干物质积累量呈自下而上逐渐降低的趋势,这与本文水稻秸秆干质量的分布特征相一致。水稻茎秆在生理上具有支持地上部、临时贮藏和运输养料的作用,由节与节间组成,其中秸秆基部1、2、3节间的长度依次增加,茎粗和茎壁厚度依次减小^[25-26],另外,作物灌浆时,茎、鞘、叶等营养器官形成的同化产物有优先向其临近的生殖器官输送的特性^[27],上层器官距离穗部近,其所存储的养分优先向穗部籽粒供应,而中下层器官距离穗部较远,向籽粒输送的养分相对较少。因此,水稻单位秸秆干物质积累量表现出由下向上增加的现象。

氮素在植物体内极易转运^[28],Hirose等^[29]早在1987发现并研究了冠层叶片氮素垂直分布规律,表现为叶片含氮量沿冠层从上向下逐渐减少,冠层氮素含量垂直梯度是作物冠层显著特点之一^[21],而关于磷素与钾素在作物垂直空间上的分布特征鲜见报道。本研究显示,秸秆N与P含量表现出由上而下逐渐减少的趋势与此相符,表明氮、磷的再利用能力较好,容易向籽粒和植株中上层营养器官转移。而秸秆K含量却表现为由上而下逐渐增加的趋势,这可能与K主要积累在植株茎鞘的中下层有关,同时还与生育后期大量钾素通过韧皮部由地上部向根部回流,并通过根系“外排”有关^[30-31]。这方面研究结果的原因还有待进一步研究。

由于作物秸秆养分空间分布的不均衡性,以植株平均养分含量乘以秸秆还田量来估算秸秆养分还田量,显然比较粗放。本文采用了“分层切段法”,即根据生产上作物机械收获可能的留茬高度,把作物植株分成若干个高度层次,测定各个层次上的N、P、K养分含量,获得不同留茬高度下秸秆的可能还田量及其不同养分归还量。测算结果贴近生产实际,具有较强的科学性与可操作性。

作物成熟后,进行机械收获作业时,作物秸秆留茬高度受多方面因素的影响。从农机手角度来看,较高留茬有利于减少机械作业能耗和机具磨损,还能提高作业效率和减少收获损失^[32];从农户角度来看,留茬高度过高,需要增加对地面留茬

粉碎再处理工序,因此留茬高度越低,越利于后续旋耕整地作业及播种栽插^[33];从基层政府角度来看,控制较低的留茬高度,可以防止农户私自焚烧秸秆,因而多要求留茬高度小于15 cm^[34]。但秸秆还田量多少合适,目前并无统一的结论。Lou等^[35]连续12年不同秸秆还田量配施化肥试验结果表明,50%秸秆还田量,其作物产量显著高于25%还田处理,但与100%秸秆还田处理间无显著差异;曾洪玉等^[36]进行的三季连续稻麦秸秆全量还田试验,三季总产量比对照增加6.73%;但也有研究表明,如果配套技术不足,短期可能对后茬作物播种(栽插)、出苗、幼苗早期生长及产量产生显著负面影响^[37-38]。多数研究认为,决定秸秆最适还田量的因素较为复杂,关键影响因素有轮作系统、耕作方式、生物产量及土壤本身肥力状况等^[39-42]。因此,作物收获时具体留茬高度要考虑作业条件与生产方式,如果需要50%秸秆量还田时一般留茬高度在35 cm左右,25%秸秆量还田时留茬高度在15 cm左右。

4 结论

水稻秸秆单位长度干物质积累量有随冠层向下逐渐增加的趋势,秸秆养分也具有明显的垂直分布特征,其中秸秆N与P含量由冠层向下递增,秸秆K含量由冠层向下递减。江苏省水稻秸秆N、P和K养分总量分别为 16.16×10^4 、 2.81×10^4 和 30.21×10^4 t,不同留茬高度秸秆养分还田量不同,留茬高度为15 cm时,水稻秸秆N、P和K养分还田量分别为 6.02×10^4 、 1.43×10^4 和 6.78×10^4 t。在估算出相应秸秆养分还田量的同时,还要根据作物生产需求、秸秆养分释放规律及其它生产条件,调整施肥策略,可以实现秸秆还田利用与作物高产同步。

参考文献:

- [1] 高利伟,马林,张卫峰,等. 中国作物秸秆养分资源数量估算及其利用状况 [J]. 农业工程学报, 2009, 25 (7): 173-178.
- [2] 毕于运,王道龙,高春雨,等. 中国秸秆资源评价与利用 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2008. 18-22.
- [3] 杨帆,董燕,徐明岗,等. 南方地区秸秆还田对土壤综合肥力和作物产量的影响 [J]. 应用生态学报, 2012, 23 (11): 3040-3044.
- [4] Balwinder - Singh E, Humphreys P L, Eberbach A, et al. Growth, yield and water productivity of zero till wheat as affected

- by rice straw mulch and irrigation schedule [J]. *Field Crops Research*, 2011, 121 (2): 209–225.
- [5] 李继福, 鲁剑巍, 任涛, 等. 稻田不同供钾能力条件下秸秆还田替代钾肥效果 [J]. *中国农业科学*, 2014, 47 (2): 292–302.
- [6] 马守田, 冯荣成, 张黛静, 等. 有机物料替代部分氮肥对小麦光合特性及产量的影响 [J]. *河南农业科学*, 2015, 44 (2): 48–51.
- [7] 田宜水, 孟海波. 农作物秸秆开发利用技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009. 159–160.
- [8] 戴志刚, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 不同作物还田秸秆的养分释放特征试验 [J]. *农业工程学报*, 2010, 6 (2): 272–276.
- [9] 李逢雨, 孙锡发, 冯文强, 等. 麦秸、油菜秸还田腐解速率及养分释放规律研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 5 (2): 374–380.
- [10] 朱兴明, 陈启德, 刘志明, 等. 多熟种植制中作物养分吸收利用特点研究 [J]. *西南农业学报*, 1995, 8 (4): 66–73.
- [11] 王伟妮, 李小坤, 鲁剑巍, 等. 氮磷钾配合施用对水稻养分吸收、积累与分配的影响 [J]. *华中农业大学学报*, 2010, 29 (6): 710–714.
- [12] 林瑞余, 梁义元, 蔡碧琼, 等. 不同品种水稻产量形成过程的养分积累与分配特征研究 [J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15 (5): 139–146.
- [13] 王丽芳, 王德轩, 上官周平. 大穗型小麦叶片性状、养分含量及氮素分配特征 [J]. *生态学报*, 2013, 33 (17): 5219–5227.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析 (第3版) [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 263–271.
- [15] 江苏省统计局. 江苏省农村统计年鉴 (2014) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2014. 220–226.
- [16] 顾克军, 杨四军, 张斯梅, 等. 不同生产条件下留茬高度对水稻秸秆可收集量的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19 (4): 831–835.
- [17] 雷小龙, 刘利, 苟文, 等. 种植方式对杂交籼稻植株抗倒伏特性的影响 [J]. *作物学报*, 2013, 39 (10): 1814–1825.
- [18] 杜小凤, 吴传万, 杨文飞, 等. “劲丰”对超级稻淮稻9号抗倒性和产量的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2012, 40 (11): 65–66.
- [19] Shi S B, Li H M, Wang X Y, et al. Comparative studies of photosynthetic characteristics typical alpine plant of Qinghai Tibet Plateau [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2006, 30 (1): 40–46.
- [20] 王之杰, 王纪华, 黄文江, 等. 冬小麦冠层不同叶层和茎鞘氮素与籽粒品质关系的研究 [J]. *中国农业科学*, 2003, 36 (12): 1462–1468.
- [21] Markus L, Katharina S, Hans S. Vertical leaf nitrogen distribution in relation to nitrogen status in grassland plants [J]. *Annals of Botany*, 2003, 92 (5): 679–688.
- [22] 李迎春, 彭正萍, 薛世川等. 磷、钾对冬小麦养分吸收、分配及运转规律的影响 [J]. *河北农业大学学报*, 2006, 29 (5): 1–6.
- [23] 侯云鹏, 韩立国, 孔丽丽, 等. 不同施氮水平下水稻的养分吸收、转运及土壤氮素平衡 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21 (4): 836–845.
- [24] 李迪秦, 秦建权, 张运波, 等. 品种与播期对齐穗期水稻群体光能截获量和干物质垂直分布的影响 [J]. *核农学报*, 2009, 23 (5): 858–862.
- [25] 胡雅杰, 曹伟伟, 钱海军, 等. 钵苗机插密度对不同穗型水稻品种产量、株型和抗倒伏能力的影响 [J]. *作物学报*, 2015, 41 (5): 743–757.
- [26] 彭志彰, 张正良, 庞桂斌, 等. 控制灌溉条件下寒区水稻茎秆抗倒伏力学评价及成因分析 [J]. *农业工程学报*, 2009, 25 (1): 6–10.
- [27] 曹卫星. 作物栽培学总论 [M]. 北京: 科学出版社, 2006. 102–106.
- [28] Hikosaka K, Terashim A I, Katoh S. Effects of leaf age, nitrogen nutrition and photo flux density on the distribution of nitrogen among leaves of a vine (*Ipomoea tricolor* Cav.) grown horizontally to avoid mutual shading of leaves [J]. *Oecologia*, 1994, 97: 451–457.
- [29] Hirose T, Werger M J A. Maximising daily canopy photosynthesis with respect to the leaf nitrogen allocation pattern in a canopy [J]. *Oecologia*, 1987, 72 (4): 520–526.
- [30] 舒海燕, 常胜合, 杨铁钊. 烟草钾素外排及其预防的初步研究 [J]. *作物杂志*, 2005, 2: 16–17.
- [31] 熊明彪, 雷孝章, 宋光煜, 等. 长期施肥条件下小麦对钾素吸收利用的研究 [J]. *麦类作物学报*, 2004, 24 (1): 51–54.
- [32] 李成浩, 潘跃. 留茬高度对收割机作业效率和成本影响分析 [J]. *农业装备技术*, 2010, 36 (1): 37–38.
- [33] 潘跃. 留茬高度对全喂入联合收割机作业效能的影响 [J]. *农业科技与装备*, 2010, 12: 31–33, 34.
- [34] 黄鹏. 机收小麦留茬高度对作业成本的影响及建议 [J]. *现代农业科技*, 2014, 7: 257–258.
- [35] Lou Y L, Xu M G. Return rate of straw residue affects soil organic C sequestration by chemical Fertilization [J]. *Soil & Tillage Research*, 2011, 113: 70–73.
- [36] 曾洪玉, 唐宝国, 蔡建华, 等. 秸秆还田对耕地质量及稻麦产量的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2011, 39 (4): 499–501.
- [37] 曾木祥, 王蓉芳, 彭世琪, 等. 我国主要农区秸秆还田试验总结 [J]. *土壤通报*, 2002, 13 (5): 336–339.
- [38] 顾克军, 张斯梅, 顾东祥, 等. 稻秸还田与播后镇压对稻茬小麦产量与品质的影响 [J]. *核农学报*, 2015, 29 (11): 2192–2197.
- [39] Tan Z, Lal R, Liu S. Using experimental and geospatial data to estimate regional carbon sequestration potential under no-till practice [J]. *Soil Science*, 2006, 171: 950–959.
- [40] Cruse R M, Herndl C G. Balancing corn stover harvest for biofuels with soil and water conservation [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 64 (4): 286–291.

- [41] Lal R. Soil quality impacts of residue removal for bioethanol production [J]. *Soil Tillage & Research*, 2009, 102: 233–241.
- [42] Johnson J M F, Allmaras R R, Reicosky D C. Estimating source carbon from crop residues, roots and rhizodeposits using the national grain – yield database [J]. *Agron J*, 2006, 98: 622–636.

Vertical distribution characteristics of rice straw nutrient and nutrient-returning amount of rice straw under different stubble height

GU Ke-jun, ZHANG Chuan-hui, GU Dong-xiang, ZHANG Si-mei, SHI Zu-liang, XU Bo, YANG Si-jun (Institute of Agricultural Resource and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Circular Agriculture Research Center of Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014)

Abstract: In order to understand the vertical distribution characteristics of rice straw nutrient and estimate the nutrient-returning amount of rice straw under different stubble heights, 10 leading rice varieties in Jiangsu province were investigated at maturity. Rice stalks below spike were cut into 6 parts from the basal node, and the first 5 parts were in 5 cm length, marked with 0~5, 5~10, 10~15, 15~20, 20~25 and >25 cm, respectively. Panicle axis and branch from rice spikes were sampled as the seventh part. Each part of rice straw was dried and weighed, and then the nutrient contents of nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) were measured. The results showed that the proportion of each section of straw to the whole rice straw in biomass decreased gradually in the range of 0 to 25 cm from the base. The N and P content of straw increased gradually from the top to the base of the plant, while the trend of the K content of straw decreased gradually from the top to the base. The total nutrients of N, P and K of rice straw in Jiangsu province were 16.16×10^4 t, 2.81×10^4 t and 30.21×10^4 t, respectively. When the stubble height left in field was 15 cm, the nutrient return of N, P and K were 6.02×10^4 t, 1.43×10^4 t and 6.78×10^4 t, respectively. The nutrient-returning amount of rice straw was estimated according to the grain yield and stubble height of rice. Meanwhile, the fertilizer management strategy should be made scientifically combing with other conditions.

Key words: rice; straw nutrient; stubble height; straw returning