植物营养与肥料学报 2009,15(2):374-380
Plant Nutrition and Fertilizer Science

麦秆、油菜秆还田腐解速率及养分释放规律研究

李逢雨[1],孙锡发[1],冯文强[1],秦鱼生[1],王昌全[2],涂仕华[1*]
(1 四川省农业科学院土壤肥料研究所,四川成都 610066;2 四川农业大学资环学院,四川雅安 625014)

摘要:采用尼龙网袋法直接覆盖还田和组织结构切片方法,研究了麦秆、油菜秆还田后的腐解速率及养分释放规律。结果表明,麦秆、油菜秆还田后,腐解速率均表现为前期快,后期慢。试验期间(100 d),麦秆、油菜秆的累计腐解率分别为 66.18%和 55.62%;养分释放均为钾 > 磷 > 氮。麦秆、油菜秆还田前 10 d 内,钾的释放分别达到 98.92%和 98.74%。在麦秆腐解过程中,前 50 d 未见任何明显的结构破坏;50 d 后,组织结构的破坏主要发生在基本组织的薄壁细胞及其所包围的维管束,表皮和机械组织以及其所包围的维管束的破坏仍不明显。在油菜秆腐解过程中,组织结构的破坏主要发生在腐解的前 10 d,次生木质部以上的维管形成层、韧皮纤维、皮层薄壁组织和表皮均受到破坏而脱落。结果说明,秸秆中的钾是水可浸提的,为速效钾,作物推荐施肥量中可减去所用秸秆的钾含量;由于秸秆中氮、磷含量较低,特别是磷,因此在还田初期可不考虑调整氮、磷肥用量。

关键词:麦秆;油菜秆;腐解;养分释放;组织结构
中图分类号:S141.4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008-505X(2009)02-0374-07

Nutrient release patterns and decomposing rates of wheat and rapeseed straw

LI Feng-yu[1], SUN Xi-fa[1], FENG Wen-qiang[1], QIN Yu-sheng[1], WANG Chang-quan[2], TU Shi-hua[1*]
(*1 Soil and Fertilizer Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China;*
2 College of Resource and Environment, Sichuan Agricultural University, Ya 'an 625014, China)

Abstract: The nutrient release patterns and decomposing rates of wheat and rapeseed straws were studied in rice fields. The straws were wrapped in net nylon bags and mulched to the fields. During the decomposing process, straw samples were taken on schedule, and were observed using electron microscope for its tissue structural images of cross sections. Results reveal that the decomposing rates of the two straws are fast at the beginning, and then slowly decrease with time. During the rice growth and development season which is about 100 d, the cumulative decomposing rates are 66.18% and 55.62% for wheat straw and rape shoot, respectively. Release rates of the nutrients of the straws are different; the K release rate is considerably greater than the rates of P and N releases. Within the first 10 d, about 98.92% of K is released from wheat straw, and 98.74% from rape shoot. Based on the electron microscopic observations, there is not noticeable tissue damage of the wheat straw at the first 50 d, and after 50 d, the tissue damage mainly take place at the parenchyma cells and its surrounded vascular bundles, while the cuticle and mechanic tissues seem not damaged significantly. For rape shoot, however, the mechanic tissue damage is observed within the first 10 d when the vascular bundle cambium outside of the secondary xylem, phloem fiber, epidermal parenchyma and cuticle are all broken. These results further demonstrate that K in the straw is water extractable and readily available to plant. Therefore, amount of K in the straws should be subtracted from the recommended fertilization, while rates of N and P should be maintained in the fertilization at early crop growth stages.

Key words: wheat straw; rape shoot; decomposition; nutrient release; tissue structure

---

收稿日期:2008-02-15　　**接受日期**:2008-06-30
基金项目:国家支撑计划项目(2006BAD05B06,2006BAD02A14-13);农业部转化资金项目(05EFN215100253);国际植物营养研究所项目(IPNI)资助。
作者简介:李逢雨(1981—),男,黑龙江绥化人,主要从事土壤肥力研究。E-mail:lfy218@sohu.com。
* **通讯作者** E-mail:stu@ipni.net

作物秸秆是农作物生产系统中一项重要的生物资源,含有较丰富的植物养分和有机碳。秸秆还田后在土壤微生物的作用下腐解,能释放出氮(N)、磷(P)、钾(K)和其他各种微量元素养分,供植物吸收利用。近年来,在国家对农作物秸秆资源合理利用的政策推动下,我国科学家已在秸秆还田对培肥土壤及提高作物产量等方面做了大量研究和积累了大量资料[1-6]。然而,对水稻 - 小麦和水稻 - 油菜轮作系统中秸秆还田后养分的释放速率和释放规律的研究相对较少。同时,现有研究大多是通过将秸秆粉碎过筛与土壤混合,测定土壤有机碳、氮的变化,进而来推断秸秆的腐解矿化进程[7-9],这与秸秆直接覆盖还田或翻埋还田条件下的腐解矿化过程有一定差异。为此,采用把秸秆置于尼龙网袋内,直接覆盖在稻田内秧苗行间,定期取样分析秸秆养分释放、腐解情况,并用切片法在数码显微镜下观察秸秆组织结构的变化,对麦秆、油菜秆还田后的腐解和养分释放特征及其与组织结构变化的关系进行研究,以期揭示麦秆、油菜秆的腐解和养分释放规律,为秸秆资源的合理利用和农田养分科学管理提供依据。

1　材料与方法

1.1　试验设计

试验设在四川省广汉市西高乡,地处东经 104°06′43″至 104°29′45″和北纬 30°53′41″至 31°08′38″之间,属亚热带湿润气候区。年均气温 16.3℃,积温 5980.4℃,降水量为 890.8 mm,日照时数为 1229.2 h,无霜期达 281 d。主要作物轮作方式为水稻 - 小麦(油菜)。供试土壤类型为灰棕冲积水稻土,其土壤 pH 值 5.54、有机质 31.3 g/kg、全 N 2.02 g/kg、全 P 1.04 g/kg、全 K 7.69 g/kg、速效 N 189.76 mg/kg、速效 P 12.61 mg/kg、速效 K 95.5 mg/kg、缓效 K 162.7 mg/kg。

1.1.1　麦秆、油菜秆田间腐解试验　腐解试验采用尼龙网袋法[10]进行。尼龙网袋规格为 35 cm × 25 cm(长 × 宽),孔径为 1 mm。供试麦秆、油菜秆经风干后,剪切至 20 cm 左右放入尼龙网袋中,扎紧袋口。每袋装麦秆 40 g(干重),油菜秆 90 g(干重),水稻插秧后置于稻田行间,代表最常见的秸秆覆盖还田。试验设 4 个处理:(1)麦秆,(2)麦秆 + 腐秆灵,(3)油菜秆,(4)油菜秆 + 腐秆灵。腐解菌名为金葵子牌腐秆灵,产自广东,用量为 30 kg/hm^2。每个处理设 12 次重复,共分 6 次取样,每次取 2 个重复,取样时间分别为还田后的 10、30、50、70、90、100 d。取样后用去离子水洗净泥沙,在阴凉干燥处悬挂晾干,供测定秸秆干重、全 N、全 P、全 K 用。供试麦秆基本养分含量为 C 451 g/kg、N 4.2 g/kg、P 0.9 g/kg、K 12.5 g/kg;油菜秆基本养分含量为 C 426 g/kg、N 4.6 g/kg、P 0.6 g/kg、K 17.6 g/kg。

分别在麦秆、油菜秆腐解的不同时期取样在 - 15℃条件下做冰冻切片(恒温冷冻切片机 SYD - K2030),观察麦秆、油菜秆腐解后组织结构的变化情况。制片方法参照刘剑锋[11]等的方法,麦秆、油菜秆的切片厚度分别为 20 μm 和 15 μm,展片后用 50% 甘油封片,在数码显微镜(Olympus BX51 - 322H01)下观察并拍照。

1.1.2　麦秆、油菜秆网室模拟试验　预备试验发现,秸秆中的 K 在前 10 d 释放速度很快。为了弄清麦秆、油菜秆在还入稻田后最初 10 d 内 K 的释放情况,进行了模拟试验。模拟试验安排在四川省农业科学院土壤肥料研究所的网室中进行。试验所用尼龙网袋规格与田间腐解试验相同,麦秆、油菜秆用量分别为每袋 20 g(干重)和 45 g(干重),试验不设加腐秆灵处理。将处理好的秸秆样品放在直径约 40 cm 的塑料盆中浸泡,每个塑料盆中放 2 个样品,盛水约 5 L,以保证淹没样品。试验设 10 个重复,于浸泡后 2、4、6、8、10 d 取样,每次取 2 个重复,测定样品干重、全 K 含量。

1.2　分析测定方法

秸秆干重用烘干法测定,烘干温度为 60℃;秸秆全 N 用 $H_2SO_4 - H_2O_2$ 消煮—蒸馏法、全 P 用钼锑抗比色法、全 K 用火焰光度计法测定[12]。

2　结果与讨论

2.1　麦秆、油菜秆还田腐解特点

麦秆、油菜秆还田后的腐解情况通常用腐解量、腐解率和腐解速率来描述。表 1 看出,两种秸秆的腐解均表现为前期快,后期慢的特点。这主要是因为在腐解前期秸秆中的可溶性有机物如多糖、氨基酸、有机酸等以及无机养分较多,为微生物提供了大量的碳源(能源)和养分,微生物数量增多,活性增强;随着腐解的进行,秸秆中可溶性有机物逐渐减少,剩余部分主要为难分解的有机物质,导致微生物活性降低,秸秆的腐解也就随之变慢。何念祖等[13]在浙江研究稻草腐解时也发现了类似的规律。

在试验的前 10 d 内,麦秆的累计腐解率为 18.26%(占总分解量的 28%),油菜秆的累计腐解率为 24.52%(占总分解量的 44%),高于麦秆;至试验

结束时的 100 d 内，麦秆的累计腐解率为 66.18%，油菜秆的累计腐解率为 55.62%，低于麦秆。这一腐解差异可能是由麦秆与油菜秆在组织结构上的较大差异所致。油菜秆外表面具有很厚的角质层，且中腔被易腐解的髓所填满；而麦秆外表面不具有像油菜秆那样厚的角质层，中腔也没有易腐解的髓，是中空的腔。在试验前 10 d，油菜秆中易腐解的髓已基本腐解，表皮层脱落，剩下的表面角质层腐解较麦秆慢。所以油菜秆在试验前 10 d 的腐解率高于麦秆，而在后期至试验结束时低于麦秆。

从各期平均腐解速率来看，麦秆的快速腐解阶段是在还田后的前 30 d，其中前 10 d 最快，为 0.73 g/d；在随后的 70 d 内，腐解率仅为 0.07～0.21 g/d。油菜秆的快速腐解阶段是在还田后的前 10 d，达到 2.21 g/d；在随后的 90 d 内，腐解率仅为 0.21～0.36 g/d。

试验中，麦秆加腐秆灵和油菜秆加腐秆灵处理的累计腐解率分别为 67.35%和 55.31%，与不加腐秆灵处理的 66.18%和 55.62%相比，并未起到加速腐解的作用。原因可能为试验所用腐秆灵属于好氧型微生物制剂，在还田后的最初几天，该试验稻田处于湿润灌溉，加腐秆灵处理的腐解率高于未加腐秆灵的处理；随后稻田保持水层，致使淹水厌氧条件下微生物不能起到促腐作用。这在四川省其他相关研究中也观察到了类似现象。

表 1 麦秆、油菜秆田间腐解情况

Table 1 Rates and amounts of wheat and rape straw decomposed as affected by inoculation of decomposing bacteria

处理 Treatment	腐解量和腐解率 Decomposing amount and rate	腐解时间 Decomposing time(d) 10	30	50	70	90	100
麦秆 Wheat straw	各期腐解量(g) Decomposing amount	7.3 ± 0.24	9.13 ± 0.28	1.42 ± 0.19	4.29 ± 0.26	2.44 ± 0.31	1.88 ± 0.25
	累计腐解率(%) Cumulative decomposing rate	18.26	41.09	44.65	55.38	61.49	66.18
	各期平均腐解速率(g/d) Average decomposing rate	0.73	0.46	0.07	0.21	0.12	0.19
麦秆 + 腐秆灵 Wheat straw inoculated with decomposing bacteria	各期腐解量(g) Decomposing amount	8.28 ± 0.23	7.77 ± 0.25	1.15 ± 0.18	2.92 ± 0.24	4.24 ± 0.30	2.57 ± 0.22
	累计腐解率(%) Cumulative decomposing rate	20.7	40.13	43.02	50.32	60.92	67.35
	各期平均腐解速率(g/d) Average decomposing rate	0.83	0.39	0.06	0.15	0.21	0.26
油菜秆 Rape shoot	各期腐解量(g) Decomposing amount	22.07 ± 0.32	8.35 ± 0.22	5.87 ± 0.18	6.06 ± 0.21	4.11 ± 0.20	3.61 ± 0.16
	累计腐解率(%) Cumulative decomposing rate	24.52	33.8	40.31	47.05	51.61	55.62
	各期平均腐解速率(g/d) Average decomposing rate	2.21	0.32	0.29	0.3	0.21	0.36
油菜秆 + 腐秆灵 Rape shoot inoculated with decomposing bacteria	各期腐解量(g) decomposing amount	22.42 ± 0.30	8.55 ± 0.21	4.22 ± 0.19	7.65 ± 0.23	3.34 ± 0.18	3.6 ± 0.18
	累计腐解率(%) Cumulative decomposing rate	24.91	34.41	39.1	47.61	51.31	55.31
	各期平均腐解速率(g/d) Average decomposing rate	2.24	0.53	0.21	0.38	0.17	0.36

2.2 麦秆、油菜秆还田养分释放特点

2.2.1 麦秆还田养分释放特点 图 1 可知，麦秆还田后 K 的释放最快，P 次之，N 最慢。在麦秆还田的前 10 d，两个处理 K 的释放率分别达到了 97.46%和 99.36%，P 的释放率为 72.78%和 80.00%，而 N 的释放率仅为 34.12%和 41.37%。至试验结束时，两个处理 K 的释放率分别为 98.92%和 99.74%，P 的释放率分别为 81.39%和 81.94%，N 的释放率分别

为 63.46%和 64.23%。这可能是因为 K 生物化学特性与 N、P 不同，在植物体内 K 不以化合物形态存在，而是以 K^+ 形态存在于细胞中或植物组织内，很容易被水浸提释放出来，这与一些研究结果基本一致[13-15]。麦秆中 K 的水易提取特性，表明这些 K 是作物可利用的速效钾。因此，在制定作物施肥方案时，可以从当季作物的需钾量中减去秸秆能释放的钾素总量，以减少钾肥的用量，保证作物高产优质；但是，在秸秆还田初期，应特别注意防止稻田钾素的流失。

图 1 还看出，在还田的前 10 d，麦秆加腐秆灵的处理 N、P 的释放率比未加腐秆灵处理高 7～8 个百分点，K 的释放率差别不大；还田 10 d 之后直至试验结束时，两个处理的 N、P、K 的累计释放率则趋同。这可能是在麦秆还田初期（前 10 d），稻田处于湿润灌溉，加入腐秆灵处理的微生物数量激增，加速了秸秆的分解，促进了养分的释放；麦秆还田 10 d 之后，田间一直保持了 5—10 cm 水层，处于淹水厌氧环境下，腐秆灵处理的微生物数量减少，且活性受到抑制，促腐作用较差。

在麦秆还田腐解至 70～90 d 时，两个处理均出现了 N、P 养分停止期或富集期。这可能是从 8 月上旬开始，试验区水稻正开始抽穗扬花，使水稻的部分花粉散落在覆盖于田间的麦秆上，散落花粉中所含的氮、磷化合物对覆盖麦秆污染造成的 N、P 暂时富集现象。但这种推测是否属实尚待进一步研究，同时还要确定散落花粉中养分的准确含量。

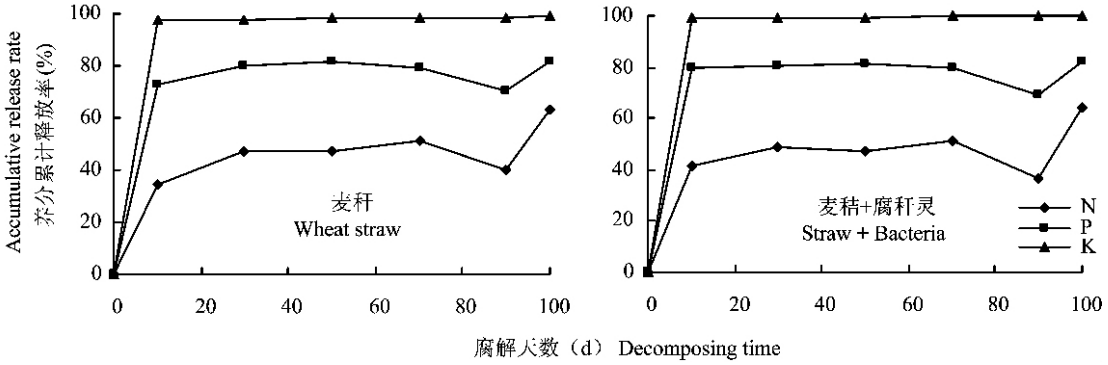

图 1　麦秆覆盖还田养分释放率

Fig.1　Nutrient release rates of the mulching wheat straw

2.2.2　油菜秆还田养分释放特点　如图 2 所示，油菜秆还田的养分释放规律与麦秆还田相似，依然为 K 释放最快，P 居中，N 最慢。加腐秆灵的处理在还田初期（前 10 d）N、P 的释放率高于未加腐秆灵的处理，至试验结束时两个处理的养分释放率趋同。再次印证了本试验使用的腐秆灵没有发挥出应有的腐解效果。在油菜秆的腐解过程中，同样观察到了在 70～90 d 腐解期间 N、P 含量升高的现象。整个试验期间，油菜秆中 N 的累计释放率略高于麦秆，P、K 的累计释放率则与麦秆相差不大。

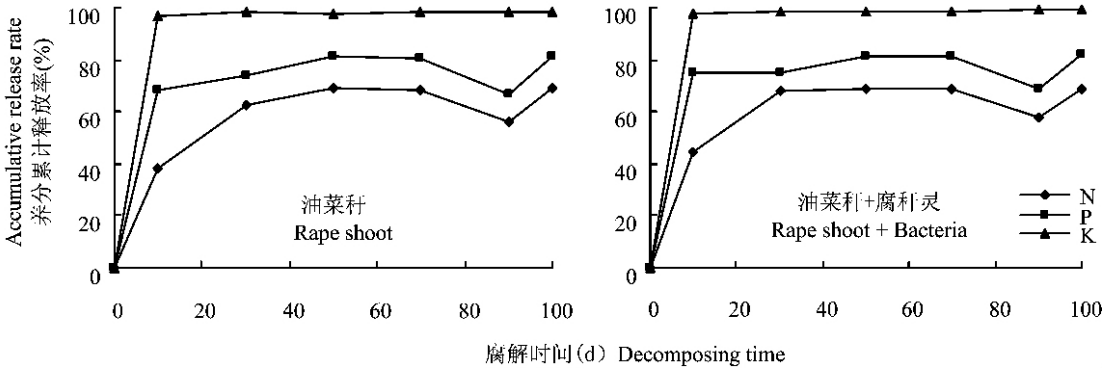

图 2　油菜秆还田养分释放率

Fig.2　Nutrient release rates of the mulching rape shoot

2.2.3 麦秆、油菜秆还田初期K的释放特点 网室模拟试验结果(图3)表明,在麦秆、油菜秆还田2 d后,大部分K养分已释放,释放率分别为74.14%和69.33%。还田6 d后,K养分已基本释放完全,累计释放率分别为94.76%和95.93%。

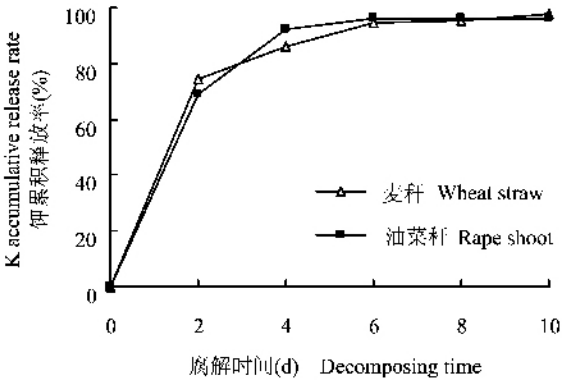

图3 麦秆、油菜秆K的释放率

Fig.3 K release rates of wheat and rape straws

2.3 麦秆、油菜秆还田后组织结构的变化特点

为进一步探索秸秆腐解程度与秸秆组织结构的破坏程度的关系。观察腐解后秸秆组织结构的变化,以更深入地了解秸秆腐解及其养分释放规律。

2.3.1 麦秆还田后组织结构的变化特点 麦秆横切面可分为表皮、机械组织、维管束和基本组织等几部分(图4A)。显微观察结果(图5)看出,麦秆还田10 d后,表皮、机械组织、维管束和基本组织均较为完好,尚未受到破坏。腐解至30 d时,只有基本组织中的薄壁细胞受到破坏,表皮、机械组织和维管束等几部分组织未发生明显变化。腐解至50 d时与30 d时的情况基本一致。腐解至70 d时,基本组织的薄壁细胞破坏较为严重,被其所包围的维管束也发生了变化,维管束壳被破坏,气腔有断裂的迹象。腐解至90 d时,基本组织的薄壁细胞大量脱落,被其所包围的维管束也因受到破坏而脱落。表皮、机械组织和被其所包围的维管束仍未发生明显的变化。腐解至100 d试验结束时,被机械组织所包围的维管束受到破坏,气腔发生断裂,表皮和机械组织仍没有受到明显的破坏。

结果说明,在麦秆还田腐解的过程中,组织结构的破坏主要发生在基本组织的薄壁细胞及其所包围的维管束,表皮和机械组织以及其所包围的维管束的破坏不明显;且麦秆对基本组织及其所包围的维管束的破坏在麦秆腐解的前期(50 d前)并不明显,主要发生在麦秆腐解的后期。在水稻生育期内,麦秆中97%的K和73%的P主要是在还田前10 d释放的,与机械组织的腐解关系不大。从秸秆腐解过程中组织结构变化的角度佐证了麦秆中K的水易提取特点,有73%的P和34%的N是易水解/分解的有机态,其余部分为难水解/分解形态,与机械组织的腐解密切相关。

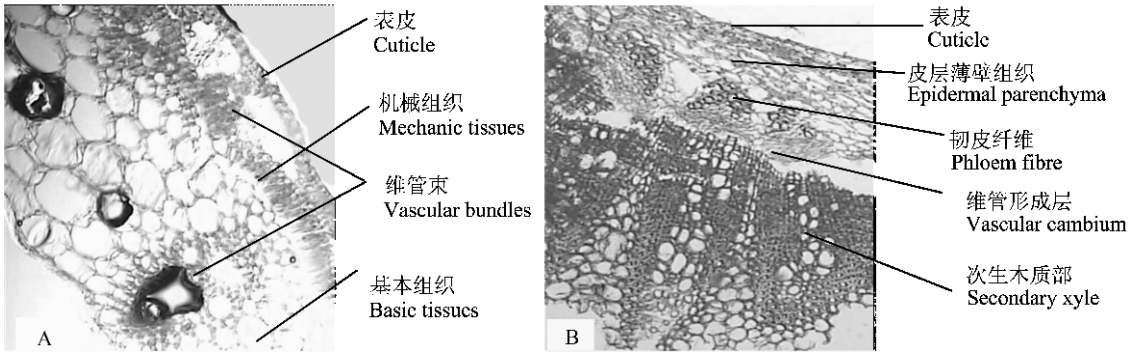

图4 麦秆(A,×10)和油菜秆(B,×4)横切面组织结构图

Fig.4 Organization structural images of wheat straw(A,×10) and rape shoot(B,×4) transverse section

2.3.2 油菜秆还田后组织结构的变化特点 油菜秆横切面可分为表皮、皮层薄壁组织、韧皮纤维、维管形成层和次生木质部等几部分(图4B)。显微观察结果(图6)看出,油菜秆还田10 d后,次生木质部以上的组织结构均受到破坏而脱落,包括维管形成层、韧皮纤维、皮层薄壁组织和表皮,随后是其次生木质部因腐解而不断变薄的过程;至100 d试验结束时,次生木质部的厚度约为原来的2/3,说明油菜秆最难腐解的部分为次生木质部。

在水稻生育期中,油菜秆中99%的K是在还田前10 d释放的,与机械组织的腐解关系不大,佐证了油菜秸秆中的K也是以离子形态存在的。虽然

前 10d 出现次生木质部以上的皮层脱落，但参考麦秆中 10 d 内 P 释放的情况，80% 的 P 应该属于易水解/分解的有机态，残余 20% 的 P 和 59% 的 N 是难水解/分解的有机态，与随后的机械组织腐解密切相关。

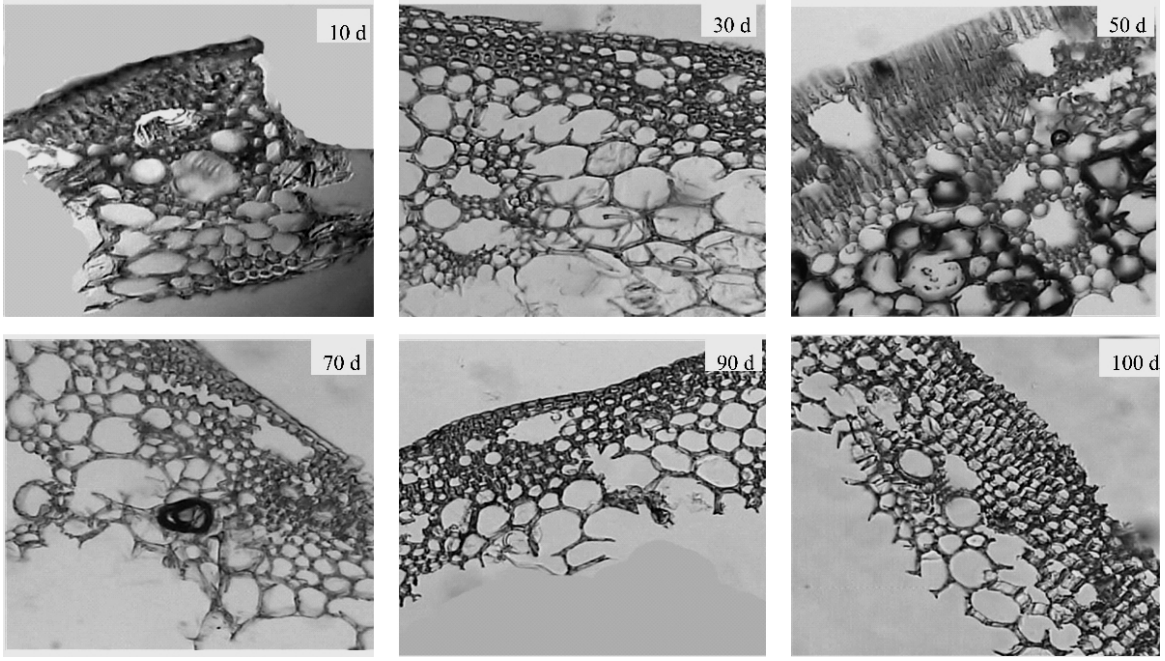

图 5　麦秆还田腐解不同阶段组织结构变化图（×10）

Fig.5　The tissue decomposing process of the mulching wheat straw

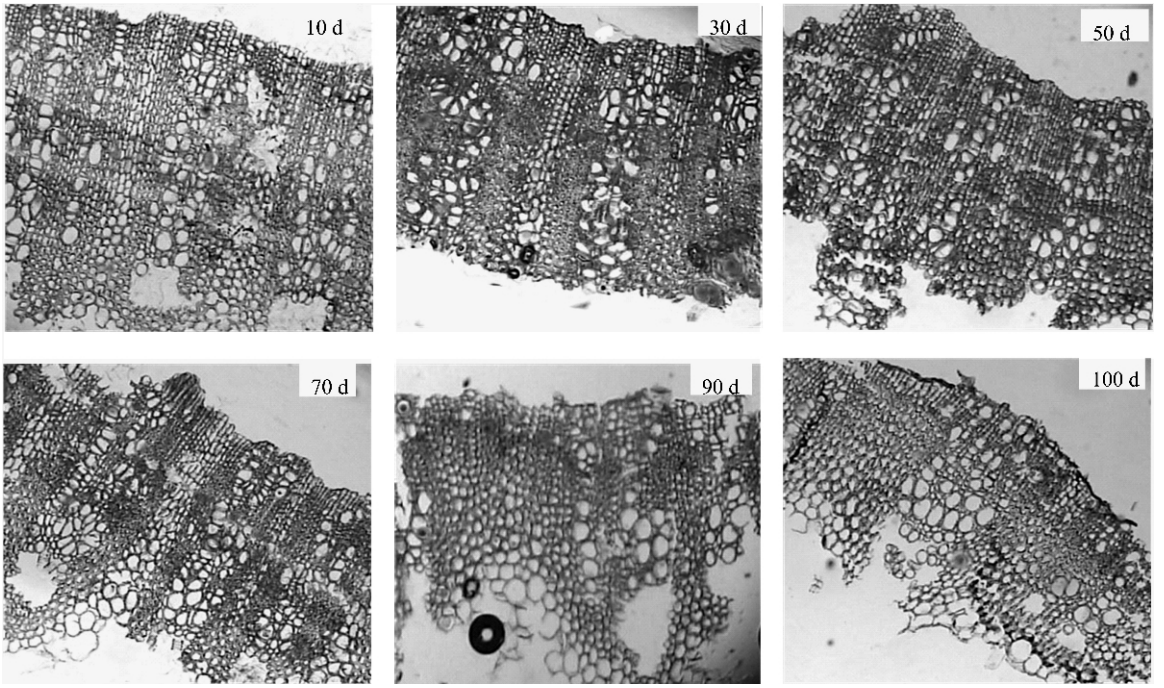

图 6　油菜秆腐解不同阶段组织结构变化图（×4）

Fig.6　The tissue decomposing process of the mulching rape shoot

3　结论

1）麦秆和油菜秆还田后腐解速率均表现为前期快，特别是还田前 10 d，随后减慢。在试验开始的前 10 d 内，麦秆的腐解率为 18.26%，油菜秆为 24.52%；在 100 d 的试验期间，麦秆、油菜秆的累积

腐解率分别为 66.18%和 55.62%，麦秆高于油菜秆。秸秆加腐秆灵并未起到加速腐解的作用，说明腐秆灵可能属于好氧型微生物制剂。

2)麦秆和油菜秆还田后 K 的释放率远远大于 P、N。麦秆和油菜秸秆中的 K 在还田前 6 d 时释放了 94.76%和 95.93%，10 d 时释放了 98.92%和 98.74%。10 d 时 P 的累积释放率分别为 72.78%和 80.00%，N 的释放分别为 34.12%和 41.37%；至试验结束时，麦秆和油菜秆中 P 的释放率分别为 81.39%和 81.94%，N 的释放率分别为 63.46%和 64.23%。

3)在麦秆还田腐解的过程中，组织结构的破坏缓慢，主要发生在基本组织的薄壁细胞及其所包围的维管束，表皮和机械组织以及其所包围的维管束的破坏不明显；在油菜秆腐解过程中，组织结构的破坏主要发生在腐解的前 10 d，次生木质部以上的维管形成层、韧皮纤维、皮层薄壁组织和表皮均受到破坏而脱落，髓部流失；随后次生木质部逐渐变薄。两种秸秆中 K 的释放与其组织结构破坏无关，其中难水解/分解形态的 P(麦秆中约占 27%，油菜秆中约占 20%)和 N(麦秆中约占 66%，油菜秆中约占 59%)与组织结构破坏的关系密切。

参 考 文 献：

[1] 陈芝兰，张涪平，蔡晓布，等. 秸秆还田对西藏中部退化农田土壤微生物的影响[J]. 土壤学报，2005，42(4)：696-699.
Chen Z L, Zhang F P, Cai X B *et al*. Effect of returning straws to field on microbes of degenerated soil in central Tibet[J]. Acta Pedol. Sin., 2005, 42(4): 696-699.

[2] 朱玉芹，岳玉兰. 玉米秸秆还田培肥地力研究综述[J]. 玉米科学，2004，12(3)：106-108.
Zhu Y Q, Yue Y L. Study on soil fertility of returning corn straw to soil[J]. Corn Sci., 2004, 12(3): 106-108.

[3] 劳秀荣，孙伟红，王真，等. 秸秆还田与化肥配合施用对土壤肥力的影响[J]. 土壤学报，2003，40(4)：619-623.
Lao X R, Sun W H, Wang Z *et al*. Effect of mulching use of straw and chemical fertilizer on soil fertility[J]. Acta Pedol. Sin., 2003, 40(4): 619-623.

[4] 劳秀荣，吴子一，高燕春. 长期秸秆还田改土培肥效应的研究[J]. 农业工程学报，2002，18(2)：49-52.
Lao X R, Wu Z Y, Gao C Y. Effect of long-term returnning straw to soil on soil fertility[J]. Trans. CSAE, 2002, 18(2): 49-52.

[5] 刘明，谭宏志，李华兴，等. 有机肥和钾肥配合施用对水稻产量及土壤肥力的影响[J]. 土壤肥料，2001，(3)：36-38.
Liu M, Tan H Z, Li H X *et al*. Effect of organic and potash fertilizer used to soil on rice yield and soil fertility[J]. Soils Fert., 2001, (3): 36-38.

[6] 王振忠，李庆康，吴敬民，等. 稻麦秸秆全量直接还田技术对土壤的培肥效应[J]. 江苏农业科学，2000，(4)：47-49.
Wang Z Z, Li Q K, Wu J M *et al*. Effect of direct returning whole rice and wheat straw to soil on soil fertility[J]. Jiangsu Agri. Sci., 2000, (4): 47-49.

[7] 鲁彩艳，陈欣. 不同施肥处理土壤及不同 C/N 比有机物料中有机 N 的矿化进程[J]. 土壤通报，2003，34(4)：267-270.
Lu C Y, Chen X. Mineralization process of soil organic nitrogen indifferent fertilizer systems and organic materials with different C/N ratios [J]. Chin. J. Soil Sci., 2003, 34 (4): 267-270.

[8] 王维敏. 麦秸、氮肥与土壤混合培养对氮素的固定、矿化与麦秸的分解[J]. 土壤学报，1986，23(2)：97-104
Wang W M. Immobilization and mineralization of nitrogen and decomposition of straw during incubation of soils mixed with wheat straw and nitrogen fertilizer[J]. Acta Pedol. Sin., 1986, 23(2): 97-104.

[9] 鲁彩艳，陈欣. 有机碳源添加对不同 C/N 比有机物料氮矿化进程的影响[J]. 中国科学院研究生院学报，2004，21(1)：108-112.
Lu C Y, Chen X. Effect of organic carbon on the mineralization process of organic nitrogenin organic material with different C/N ratio[J]. J. Grad. School CAS, 2004, 21 (1): 108-112.

[10] 胡肄慧，陈灵芝，陈清朗，等. 几种树木叶子分解速率的试验研究[J]. 植物生态学与地植物学学报，1987，11(2)：124-131.
Hu Y H, Chen L Z, Chen Q L *et al*. Studies on the litter decomposition rates of several plants[J]. Acta Phytoecol. Geobot. Sin., 1987, 11(2): 124-128.

[11] 刘剑锋，程云清，阎秀峰，等. 植物冰冻切片技术的改进[J]. 南京林业大学学报(自然科学版)，2006，30(3)：128-130.
Liu J F, Cheng Y Q, Yan X F *et al*. Improvement of plant Cryo-sectioning technique[J]. J. Nanjing For. Univ. (Nat. Sci. Ed.), 2006, 30 (3): 128-130.

[12] 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. 127-306.
Lu R K. Soil agrochemistry analysis method[M]. Beijing: China Agricultural Scientech Press, 2000. 127-306.

[13] 何念祖，林咸永，林荣新，等. 面施和深施对秸秆中氮磷钾释放的影响[J]. 土壤通报，1995，26(7)：40-42.
He N Z, Lin X Y, Lin R X *et al*. Effect of straw mulch and buried on the releases of nitrogen, phosphorus and potassium in straw[J]. Chin. J. Soil Sci., 1995, 26(7): 40-42.

[14] 杨振权，陈永星. 水田机械秸秆深施的养分释放及增产效果研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版)，2000，26(3)：329-331.
Yang Z Q, Chen Y X. Study on nutrient release and yield added of irrigated field straw buried[J]. J. Zhejiang Univ. (Agric. & Life Sci.), 2000, 26(3): 329-331.

[15] 吴珊眉，House G J，韩纯儒. 免耕和常规耕作农田生态系统冬季覆盖作物残茬分解和养分变化[J]. 土壤学报，1986，23(3)：204-211.
Wu S M, House G J, Han C R. Variation of nutrient elements of winter cover crop residues in agroecosystem under no tillage and conventional tillage[J]. Acta Pedol. Sin., 1986, 23(3): 204-211.