

李忠义,何铁光,蒙炎成,等. 稻田豆科冬季绿肥腐解及养分释放特征研究[J]. 江苏农业科学,2018,46(13):241-245.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.13.056

稻田豆科冬季绿肥腐解及养分释放特征研究

李忠义,何铁光,蒙炎成,韦彩会,唐红琴

(广西农业科学院农业资源与环境研究所,广西南宁 530007)

摘要:为明确豆科冬季绿肥作物紫云英、苕子的腐解和养分释放规律,采用网袋法研究其在稻田中的腐解动态。结果表明,在稻田环境中,紫云英和苕子的茎秆在 0~20 d 腐解速度较快,累计腐解率分别为 42.3%、44.6%,之后,腐解缓慢,在 100 d 时,紫云英和苕子累计腐解率分别达 74.5%、76.6%。经过 100 d 的腐解,紫云英的碳、氮、磷、钾累计腐解率分别为 70.1%、72.3%、81.2%、89.3%;苕子的碳、氮、磷、钾累计腐解率分别为 76.3%、75.5%、83.5%、91.1%。紫云英和苕子茎秆养分的释放速率表现为钾>磷>氮≈碳。苕子的茎秆累计腐解率及碳、氮、磷、钾等养分的累计释放率均大于紫云英,翻压还田后其理论化肥减施量大于紫云英。

关键词:冬季绿肥;紫云英;苕子;腐解特征;养分释放特征;稻田;农田养分管理;土壤改良

中图分类号: S142 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)13-0241-04

绿肥是我国传统农业的精华,作为一种生物肥源,有改土培肥、提高农产品品质的作用。广西有着悠久的绿肥种植史,在近代有过 2 次发展高峰,第 1 次发展高峰是 1964—1974 年,这期间全广西地区冬种绿肥面积达 48.4 万 hm^2 /年;第 2 次发展高峰期是 1989—1996 年,广西地区种植绿肥总面积都在 46.7 万 hm^2 /年以上。但随着化肥应用的推广和耕地复种指数的提高,自 20 世纪 80 年代开始绿肥种植面积迅速滑坡^[1]。近年来,随着土壤环境的恶化,人们对绿色农产品的需求不断增加^[2]。现代农业呼唤传统农业的精华回归,2015 年农业部提出了到 2020 年实现“一控两减三基本”的目标,也制定了《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》,而种植和利用绿肥作物,有利于化肥减量施用,对保障农产品安全,保护农田生态环境,促进农业可持续发展有着重要意义。

赵其国等指出,充分利用冬闲田,实行绿肥过腹还田是保证南方红壤生态系统持续稳定健康发展的手段之一^[3]。广西属亚热带季风气候区,冬季光热资源丰富,每年适宜种植绿肥的冬闲田在 60 万 hm^2 以上^[4]。紫云英和苕子有培肥地力的作用,是用地、养地、改良中低产田地、建设高产稳产农田的有效途径,也有助于促进休闲农业和乡村旅游业的发展,是广西主推的稻田冬季绿肥作物。关于紫云英和苕子的腐解特征及碳、氮、磷、钾养分释放规律的研究,前人多采用异地还田或模拟培养试验等方法。潘福霞等研究了紫云英、苕子在旱地的腐解特征^[5-8];王飞等以盆栽培育方法研究了 70% 田间持

水量下紫云英的有机碳和养分的释放特征^[9];高桂娟等以盆栽试验,模拟淹水土壤环境中紫云英的腐解特征^[10]。本研究充分考虑广西地区稻—稻—冬季绿肥轮作系统的实际,在早稻种植前将紫云英、苕子翻压还田,研究其在稻田环境中的腐解及养分释放特征,以期广西稻田冬季绿肥的合理利用和后期农田养分科学管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试绿肥作物为紫云英、苕子,种质资源来源于广西农业科学院农业资源与环境研究所。在其盛花期取 200 g 地上部分样品,切成 2~3 cm 的小段,装入尼龙网袋(面积 20 $\text{cm} \times 30 \text{ cm}$,孔径 75 μm)待用。供试样品的养分含量见表 1。

表 1 紫云英、苕子的碳、氮、磷、钾等养分含量

绿肥种类	含量(%)				
	干物质	全碳	全氮	全磷	全钾
紫云英	15.48	41.05	2.294	0.325	2.709
苕子	14.50	42.34	3.675	0.426	3.128

1.2 试验设计

试验于 2016 年 3 月 21 日至 2016 年 6 月 29 日在广西农业科学院农业资源与环境研究所试验基地进行,将尼龙袋埋至水稻田中,埋深 10 cm,每个处理设 3 个重复。供试土壤类型为第四纪红色黏土发育而来的水稻土,土壤基本理化性质:pH 值为 6.45,有机质含量为 30.1 g/kg,全氮含量为 1.6 g/kg,全磷含量为 1.0 g/kg,全钾含量为 3.7 g/kg;微生物类群:细菌含量为 6.125×10^6 CFU/g、真菌含量为 6.850×10^4 CFU/g、放线菌含量为 2.121×10^6 CFU/g。分别在还田 0、20、40、60、80、100 d 后取样,腐解期平均气温见表 2。样品用自来水冲洗干净,烘干称质量,磨碎,测定碳、氮、磷、钾等物质的含量。

1.3 测定方法

植物样品中全碳含量用重铬酸钾容量法—外加热法测定;植株样品经浓硫酸—双氧水消煮后,用凯氏定氮法测定全

收稿日期:2017-01-09

基金项目:国家绿肥产业技术体系建设项目(编号:CARS-22);广西科学研究与技术开发计划项目(编号:桂科攻 1598006-4-4、桂科 AB16380171);广西自然科学基金(编号:2017GXNSFBA198204);广西农业科学院基金(编号:桂农科 2016JZ10、桂农科 2015YT31)。
作者简介:李忠义(1983—),男,山东菏泽人,硕士,副研究员,主要从事植物营养与环境生态研究。Tel:(0771)3245836;E-mail:lizhongyi2007@163.com。

通信作者:唐红琴,副研究员,主要从事植物营养与环境生态研究。
E-mail:tanghq@gxaas.net。

氮含量,用比色法测定全磷含量,用火焰光度计法测定全钾含量^[11]。

表 2 腐解期平均气温

翻压时间(d)	温度(℃)
0~20	14.8~22.1
21~40	21.7~29.7
41~60	22.9~30.7
61~80	24.4~31.5
81~100	25.4~32.9

1.4 试验计算

累计腐解率 = (0 d 后的干物质总量 - n d 后的干物质总量) / 0 d 后的干物质总量 $\times 100\%$; 养分累计释放率 = (0 d 后的养分总量 - n d 后的养分总量) / 0 d 后的养分总量 $\times 100\%$ 。其中, n 为翻压天数。

1.5 数据处理

试验数据在 Excel 中进行处理并作图。

2 结果与分析

2.1 绿肥还田后的腐解特征

由图 1 可知,随着时间的推移绿肥的累计腐解率均呈逐渐增加的趋势。还田 20 d 内腐解较快,还田 20 d 时,紫云英和苕子的累计腐解率分别为 42.3%、44.6%,平均腐解速率分别为 0.655、0.646 g/d;还田 20~100 d 腐解缓慢,紫云英和苕子的累计腐解率分别达 74.5%、76.6%,平均腐解速率分别为 0.124、0.116 g/d,腐解速率明显小于前 20 d。在稻田环境中,紫云英和苕子的平均腐解速率基本一致,苕子的累计腐解率略大于紫云英。

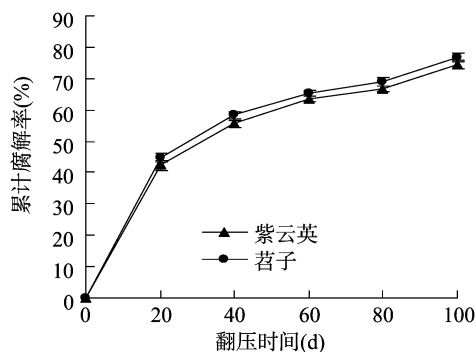


图1 绿肥还田后的腐解特征

2.2 绿肥还田后碳释放特征

由图 2 可知,紫云英和苕子还田后的前 20 d,碳累积释放率较大,分别为 46.2%、50.1%,之后释放缓慢,到 100 d 时,两者的碳累积释放率分别达到 70.1%、76.3%。在稻田环境中,整个腐解期苕子的碳累积释放率均大于紫云英的碳累积释放率。

2.3 绿肥还田后氮释放特征

由图 3 可知,紫云英和苕子还田后的前 20 d,氮累积释放率较大,分别达到 45.3%、48.8%,20 d 后释放缓慢,到 100 d 时,氮累积释放率分别达到 72.3%、75.5%。在稻田环境中,整个腐解期苕子的氮累积释放率均大于紫云英的氮累积释放率。

2.4 绿肥还田后磷释放特征

由图 4 可知,紫云英和苕子还田后的前 20 d,磷释放速率

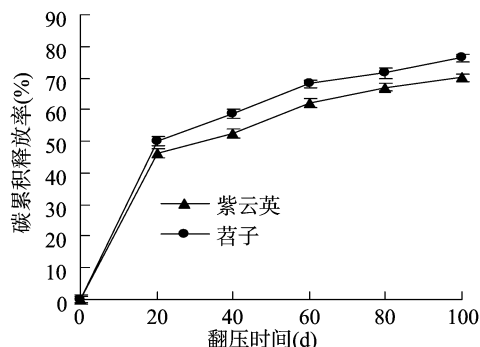


图2 绿肥还田后碳释放特征

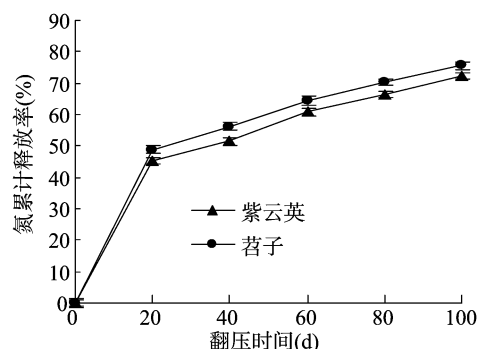


图3 绿肥还田后氮释放特征

最大,分别达到 54.6%、58.2%,之后释放缓慢,到 100 d 时,两者的磷累积释放率分别达到 81.2%、83.5%。在稻田环境中,整个腐解期苕子的磷累积释放率均大于紫云英的磷累积释放率。

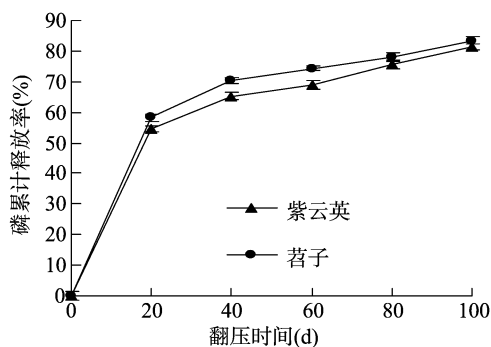


图4 绿肥还田后磷释放特征

2.5 绿肥还田后钾释放特征

由图 5 可知,紫云英和苕子还田后的前 20 d,钾累积释放速率较大,分别达到 76.3%、78.2%,之后释放缓慢,到 100 d 时,两者的钾累积释放率分别达到 89.3%、91.1%。在稻田环境中,整个腐解期苕子的钾累积释放率均大于紫云英的钾累积释放率。

2.6 绿肥还田后碳与各养分比例的变化特征

由图 6 可知,紫云英和苕子还田后的碳氮比均表现为先降后升,变化不大,整个腐解期紫云英的碳氮比在 17.35~19.32 之间,苕子的碳氮比在 10.35~11.53 之间,且在整個腐解期内碳氮比均表现为紫云英 > 苕子。

由图 7 可知,紫云英和苕子还田后的碳磷比在 0~40 d 时快速上升,到 40 d 时两者的碳磷比分别为 17.36、13.83;40~60 d 时呈下降趋势,之后逐渐升高。整个腐解期紫云英

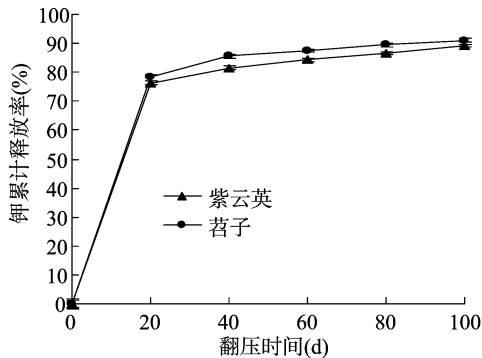


图5 绿肥还田后钾释放特征

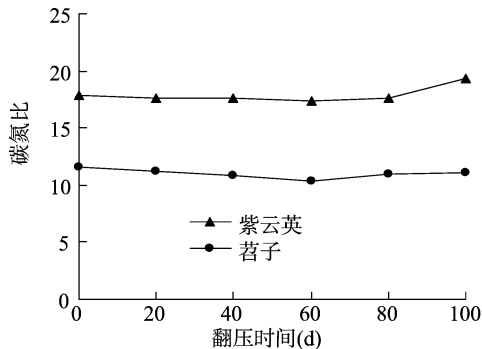


图6 绿肥还田后碳氮比的动态变化

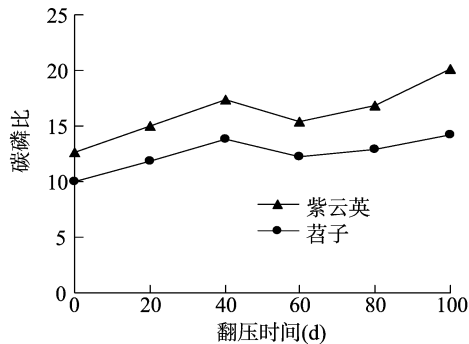


图7 绿肥还田后碳磷比的动态变化

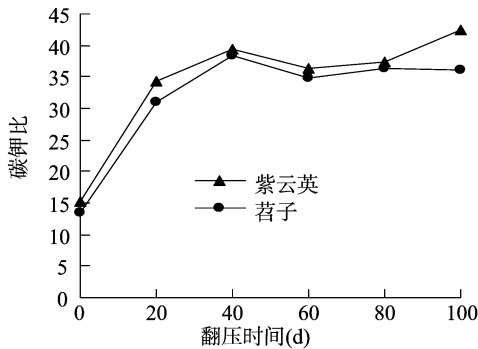


图8 绿肥还田后碳钾比的动态变化

的碳磷比在 12.63 ~ 20.09 之间,苕子的碳磷比在 9.94 ~ 14.28 之间,且在整个腐解时期内碳磷比均表现为紫云英 > 苕子。

由图 8 可知,紫云英和苕子还田后的碳钾比在 0 ~ 40 d 时快速上升,在 40 d 时两者的碳钾比分别为 39.28、38.46; 40 ~ 60 d 时呈下降趋势,之后逐渐升高。整个腐解期紫云英的碳钾比在 15.15 ~ 42.34 之间,苕子的碳钾比在 13.54 ~ 38.46 之间,且在整个腐解期内碳钾比均表现为紫云英 > 苕子。

2.7 绿肥还田理论养分释放情况

表 3 早稻生育期内绿肥的理论养分释放量

绿肥种类	养分	干物质含量 (%)	翻压前含量 (%)	翻压前累计量 (kg/hm ²)	释放率 (%)	释放量 (kg/hm ²)	残留量 (kg/hm ²)
紫云英	碳	15.48	41.050	1 429.77	70.10	1 002.27	427.50
	氮	15.48	2.294	79.90	72.30	57.77	22.13
	磷	15.48	0.325	11.32	81.20	9.19	2.13
	钾	15.48	2.709	94.35	89.30	84.25	10.10
苕子	碳	14.50	42.340	1 381.34	76.30	1 053.96	327.38
	氮	14.50	3.675	119.90	75.50	90.52	29.38
	磷	14.50	0.426	13.90	83.50	11.61	2.29
	钾	14.50	3.128	102.05	91.10	92.97	9.08

3 讨论

不同绿肥作物翻压还田后,受土壤环境、气候条件等影响^[13],腐解速率不一,但其腐解过程一般包括快速腐解期和缓慢腐解期。本研究结果表明,紫云英和苕子在还田后前 20 d 腐解速度较快,其养分有暴发式地释放,随后干物质和养分释放比较缓慢。前人在研究豆科绿肥(大豆、绿豆、长武怀豆、紫花苜蓿)^[7,14-15]、十字花科绿肥(二月兰)^[16]、禾本科绿肥(黑麦草、高羊茅)^[7]、菊科绿肥(菊苣、肿柄菊)^[7,17]及树木的枯枝落叶^[18]等的腐解过程中均呈现类似的规律。绿肥

根据广西地方标准免耕稻田冬绿肥生产技术规程^[12],以紫云英和苕子适宜还田翻压量为 22 500 kg/hm² 来计算,由表 3 可知,至 100 d 时紫云英的氮、磷、钾累计释放量分别达 57.77、9.19、84.25 kg/hm²;苕子的氮、磷、钾累计释放量分别达 90.52、11.61、92.97 kg/hm²,且苕子氮、磷、钾累计释放量均大于紫云英,有利于后茬早稻化肥的减施。同时,紫云英和苕子腐解过程中释放出的大量碳对改善土壤物理化学性质具有重要意义。

作物前期腐解快,后期腐解慢,其原因可能是在腐解前期秸秆中可溶性有机物及无机养分较多,为微生物提供了大量的碳源和养分,微生物数量增加,活性增强;后期随着腐解的进行,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,秸秆的腐解也随之变慢^[19-20]。本研究结果表明,在还田后的 20 d 内,紫云英和苕子能供给早稻大部分的养分,为早稻的生长发育创造一个良好的环境,减少化肥的施用量,为南方双季稻区稻—稻—冬季绿肥轮作模式的推广提供了有力的理论依据。

绿肥翻压后其植株氮、磷、钾养分的释放会对后茬作物的

生长产生影响,明确绿肥作物翻压后养分的释放规律对科学合理地利利用绿肥作物具有重要意义。从养分的矿化速率来看,紫云英和苕子的氮、磷、钾养分释放过程明显不同。钾的释放速率最大,到 100 d 时,紫云英和苕子的钾累计释放率分别达到 89.3%、91.1%,其次是磷,氮和碳累计释放率相差不大,释放速率小于钾和磷。其主要原因可能是茎秆中钾不以化合态形式存在,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,释放速度较快;磷、氮以难分解的有机态为主,物理作用下不容易分解,释放较慢;而碳主要以有机态存在,不容易腐解^[21]。潘福霞等研究箭筈豌豆、苕子、山豆、麦秆、油菜秆等还田后,秸秆的养分释放速率均表现为钾 > 磷 > 氮^[5,22];邹雨坤等研究不同还田方式下木薯、香蕉、小麦茎秆的腐解特征,研究结果均表明,腐解过程中秸秆养分的释放速率均表现为钾 > 磷 > 氮 ≈ 碳^[23-25]。本研究的结果表明,紫云英和苕子还田后钾素释放量较大且速度较快,因此,在种植后季作物时可根据其养分需求规律适当减少基肥中钾肥的施用量,合理配施磷肥、氮肥。

不同种类绿肥腐解和养分释放速率不同。在相同的外界环境条件下,绿肥腐解速度由植株的组成成分、组织结构、碳氮比等因素决定。当碳氮比小于 25:1 时,微生物不再利用土壤中的有效氮,有机物能够较完全地被分解并释放出矿质态氮^[26]。Pereira 等研究菽麻、刀豆、木豆、猪屎豆、拉巴豆、豇豆等豆科绿肥还田腐解时指出,菽麻分解速度最慢,与其高碳氮比有关,而刀豆分解速度最快,与其低碳氮比有关^[27]。本研究中整个腐解期紫云英的碳氮比在 17.35~19.32 之间,苕子的碳氮比在 10.35~11.53 之间,且碳氮比表现为紫云英 > 苕子,利于微生物的分解,且相同还田条件下苕子秸秆累计腐解率及碳、氮、磷、钾等养分累计释放率均大于紫云英,可能与苕子的低碳氮比有关。紫云英的碳磷比、碳钾比均大于苕子,至于碳磷比、碳钾比与绿肥腐解和养分释放速率是否有关,及两者在什么范围内更利于腐解有待深入探讨。

研究表明,水稻生产中推荐氮、五氧化二磷、氧化钾的施用量分别为 120、42.78 kg/hm²^[28]。根据理论分析结果,紫云英以 22 500 kg/hm² 的翻压还田量,可释放氮 57.77 kg/hm²、磷 9.19 kg/hm²、钾 84.25 kg/hm²,可为后茬早稻生长提供 48.14% N、21.88% P₂O₅、108.01% K₂O;苕子以 22 500 kg/hm² 的翻压还田量,可释放氮 90.52 kg/hm²、磷 11.61 kg/hm²、钾 92.97 kg/hm²,可为后茬早稻生长提供 75.43% N、27.64% P₂O₅、119.19% K₂O,理论翻压还田后可大大减少后茬早稻化肥的减施。而大田研究结果表明,紫云英还田可减少无机氮肥的施用量,后茬作物水稻化肥施用量可减少 20%~40%^[29];Xie 等研究表明,江西双季稻区紫云英替代 20%、40% 化肥的情况下,土壤肥力和早晚稻产量高于单施氮肥的处理^[30];李双来等研究表明,湖北双季稻区紫云英可替代 20% 的化肥^[31]。因此,紫云英翻压还田大田试验土壤肥力提高量远小于理论值,其主要原因可能是随着腐解时间的推移,碳、氮在腐解过程中以气态损失,磷、钾在土壤中逐渐转化为难溶态^[9]。同时,紫云英和苕子在生长中从土壤中吸收了养分,而还田后释放的养分究竟有多少转化为有效态供后茬作物吸收利用? 这还须进一步研究。

4 结论

紫云英和苕子茎秆前期腐解快,后期腐解慢,其养分的释放速率均表现为钾 > 磷 > 氮 ≈ 碳;苕子茎秆的累计腐解率及碳、氮、磷、钾等养分的累计释放率均大于紫云英,苕子翻压还田后的理论化肥减施量大于紫云英。

参考文献:

- [1] 曹卫东,黄鸿翔. 关于我国恢复和发展绿肥若干问题的思考[J]. 中国土壤与肥料,2009(4):1-3.
- [2] Zhang L P, Zhang S W, Zhou Z M, et al. Spatial distribution prediction and benefits assessment of green manure in the Pinggu District, Beijing, based on the CLUE - S model [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15(2):465-474.
- [3] 赵其国,黄国勤,马艳芹. 中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J]. 生态学报,2013,33(24):7615-7622.
- [4] 李少泉,甘海燕,莫如平. 发展广西冬种绿肥生产的对策思考[J]. 广西农学报,2012,27(6):1-5.
- [5] 潘福霞,鲁剑巍,刘威,等. 三种不同绿肥的腐解和养分释放特征研究[J]. 植物营养与肥料学报,2011,17(1):216-223.
- [6] 宁东峰,马卫萍,孙文彦,等. 华北地区棉田翻压冬绿肥腐解及养分释放规律研究[J]. 华北农学报,2011,26(6):164-167.
- [7] 邓小华,罗伟,周米良,等. 绿肥在湘西烟田中的腐解和养分释放动态[J]. 烟草科技,2015,48(6):13-18.
- [8] 孔伟,耿明建,储刘专,等. 光叶紫花苕子在烟田中的腐解及养分释放动态研究[J]. 中国土壤与肥料,2011(1):64-68.
- [9] 王飞,林诚,李清华,等. 亚热带单季稻区紫云英不同翻压量下有机碳和养分释放特征[J]. 草业学报,2012,21(4):319-324.
- [10] 高桂娟,李志丹,韩瑞宏,等. 3 种南方绿肥腐解特征及其对淹水土壤养分和酶活性的影响[J]. 热带作物学报,2016,37(8):1476-1483.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2000:128-271.
- [12] 广西壮族自治区质量技术监督局. 免耕稻田冬绿肥生产技术规程:DB 45/T 992—2014[S]. 2014.
- [13] Talgre L, Lauringson E, Roostalu H, et al. Phosphorus and potassium release during decomposition of roots and shoots of green manure crops[J]. Biological Agriculture & Horticulture, 2014, 30(4):264-271.
- [14] 赵娜,赵护兵,鱼昌为,等. 旱地豆科绿肥腐解及养分释放动态研究[J]. 植物营养与肥料学报,2011,17(5):1179-1187.
- [15] 崔志强,李宪利,崔天舒. 果园绿肥腐解及养分释放动态研究[J]. 中国农学通报,2014,30(22):121-127.
- [16] 刘佳,陈信友,张杰,等. 绿肥作物二月兰腐解及养分释放特征研究[J]. 中国草地学报,2013,35(6):58-63.
- [17] Jama B, Palm C A, Buresh R J, et al. Tithonia diversifolia as a green manure for soil fertility improvement in western Kenya; a review[J]. Agroforestry Systems, 2000, 49(2):201-221.
- [18] 吴蔚东,黄春昌,刘仁林,等. 江西省不同林型下枯枝落叶分解和养分释放的动态[J]. 江西农业大学学报,1996,18(1):61-66.
- [19] Tian G, Badejo M A, Okoh A I, et al. Effects of residue quality and climate on plant residue decomposition and nutrient release along the

蔡兴冉,黄志英,梁彦庆,等. 我国东部地区耕地等别空间分布特征[J]. 江苏农业科学,2018,46(13):245-250.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.13.057

我国东部地区耕地等别空间分布特征

蔡兴冉¹, 黄志英², 梁彦庆¹, 邢美玲¹, 葛京凤¹, 潘佩佩¹

(1. 河北师范大学资源与环境科学学院/河北省环境演变与生态建设实验室, 河北石家庄 050024;

2. 河北地质大学土地资源与城乡规划学院, 河北石家庄 050031)

摘要: 总体把握我国东部地区耕地等别及其空间分布特征, 对该地区耕地保护和土地整治对策的制定具有重要意义。以 2015 年我国东部地区 10 个省(市)农用地分等国家级汇总成果为基础, 对耕地等别数量结构、省域分布、土地利用区分布、复种类型、经济分区分布以及等别离散程度进行综合分析。结果表明, 我国东部地区的耕地等别被分为 1~15 等, 其中以高、中等地为主, 平均等别为 8.19 等, 略高于全国耕地平均等别; 各省(市)耕地等别差异性明显, 其中上海、广东、江苏等南方省(市)的耕地等别较高, 主要为 5~6 等, 而天津、河北等北方省(市)的耕地等别较低, 主要集中在 7 等及之后; 在三大土地利用区中, 苏浙沪区和闽粤琼区的耕地等别明显高于京津冀鲁区; 在标准耕作制度区中, 复种次数越多, 耕地等别越高; 在经济分区中, 耕地等别呈现由快速发展区、高速发展区、平稳发展区依次递减的规律; 从耕地等别离散程度来看, 浙江、广东、海南等南方省(市)的耕地可改善程度较高, 北京、天津等北方省(市)的耕地可改善程度较低。总体上可为东部地区耕地的质量提升以及布局优化提供理论依据。

关键词: 东部地区; 面积加权平均法; 等别方差法; 耕地等别; 空间分布特征; 复种指数

中图分类号: F323.211 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)13-0245-06

耕地是人类赖以生存的基本资源, 在人类生产和社会发展中具有重要作用, 不同的耕地质量所提供的粮食生产能力不同。近年来, 随着社会经济的快速发展, 尤其是大城市的扩

张, 建设用地不断增加, 城市周边优质耕地不断被占用, 从而引起耕地质量降低, 因此关于耕地质量等别成果空间差异性特征分析的研究日益重要。在全国(区域)尺度上, 王洪波等采用标准亩的概念, 以全国 1 等地为基准核算我国标准耕地总量, 分析我国耕地等别分异特性^[1]; 孔祥斌等采用面积加权平均法分析我国西部耕地等别空间分布特征^[2]; 魏洪斌等基于 ArcGIS 空间统计分析, 应用加权平均法分析我国中部粮食主产区耕地等别空间分布特征^[3]; 王凤娇等对西北五省(区)耕地质量等别差异性进行分析^[4]; 李鹏山等分析了京津冀地区耕地质量等别的空间差异^[5]; 马龙泉等分析了三江平原耕地质量等别空间分异特征^[6]; 陈建龙等分析了松嫩平原耕地等别空间分异特征^[7]。在省(市)域尺度上, 晏蔚楠等分

收稿日期: 2017-11-01

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 41471090、41401646); 河北省自然科学基金(编号: 41471090、41401646); 河北省自然科学基金(编号: D2015205225); 河北师范大学博士基金(编号: L2016B14); 河北师范大学研究生创新资助项目(编号: CXZZSS2017066)。

作者简介: 蔡兴冉(1993—), 女, 山东济宁人, 硕士研究生, 主要从事区域经济与土地利用研究。E-mail: 1030370275@qq.com。

通信作者: 梁彦庆, 博士, 副教授, 主要从事区域经济与土地利用、土地资源评价与规划研究。E-mail: liangyanqing@126.com。

transect from humid forest to Sahel of West Africa [J]. Biogeochemistry, 2007, 86(2): 217-229.

[20] Thomsen I K, Schjønning P, Jensen B, et al. Turnover of organic matter in differently textured soils: II. Microbial activity as influenced by soil water regimes [J]. Geoderma, 1999, 89(3/4): 199-218.

[21] 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.

[22] 李逢雨, 孙锡发, 冯文强, 等. 麦秆、油菜秆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, 15(2): 374-380.

[23] 邹雨坤, 李光义, 侯宪文, 等. 不同还田方式下木薯茎秆腐解及养分释放特征研究 [J]. 中国土壤与肥料, 2014(6): 86-91.

[24] 邹雨坤, 李光义, 李勤奋, 等. 不同还田方式下香蕉茎秆的腐解及养分释放特征 [J]. 天津农业科学, 2014, 20(10): 60-64.

[25] 武际, 郭熙盛, 鲁剑巍, 等. 不同水稻栽培模式下小麦秸秆腐解特征及对土壤生物学特性和养分状况的影响 [J]. 生态学报,

2013, 33(2): 565-575.

[26] 黄昌勇. 土壤学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 36-37.

[27] Pereira N S, Soares I, Miranda F R D. Decomposition and nutrient release of leguminous green manure species in the Jaguaribe - Apodi region, Ceará, Brazil [J]. Ciência Rural, 2016, 46(6): 970-975.

[28] 林新坚, 章明清. 新型肥料施用技术 [M]. 福州: 福建科学技术出版社, 2009: 10-22.

[29] 何春梅. 福建紫云英种植利用模式研究 [M] // 林新坚, 王飞, 何春梅. 紫云英理论与实践. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2014: 11-16.

[30] Xie Z J, Tu S X, Shah F, et al. Substitution of fertilizer - N by green manure improves the sustainability of yield in double - rice cropping system in south China [J]. Field Crops Research, 2016, 188: 142-149.

[31] 李双来, 李登荣, 胡诚, 等. 减施化肥条件下翻压不同量紫云英对双季稻生长和产量的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2012(1): 69-73.