

基于农田养分管理的杂草生态防控对策研究

潘俊峰¹ 陈防^{1,2*} 校

(1. 中国科学院武汉植物园, 武汉, 430074; 2. 国际植物营养研究所 (IPNI) 武汉代表处, 武汉, 430074)

摘要: 农田杂草是农田生态系统的重要组成部分, 揭示杂草种群对养分管理模式的响应及其机制是进一步通过科学的养分管理来实现防控农田杂草和保持农田杂草生物多样性及农田生态系统平衡的关键。为此, 作者总结了农田养分管理与农田杂草群落特征关系的研究进展、指出了存在的问题, 并从农田杂草的重点防控对象、农田优势杂草种群和竞争临界期的确定以及杂草的生态化学计量学特征等方面对杂草生态防控对策进行了分析评价。在此基础上, 作者提出了土壤营养调控假设, 期望为制定农田杂草综合管理策略以及保护农田生态环境提供新的思路。

关键词: 养分管理; 农田杂草; 土壤杂草种子库; 生物多样性; 生态化学计量学

农田杂草作为农业生态系统的重要组成部分, 是长期适应气候、土壤等因素, 以及与作物竞争的结果^[1]。它与作物竞争水、肥、光、生长空间等资源^[2], 影响作物产量与品质^[3], 而且其防除过程中使用的一些高毒高残留农药也会对农业生态环境造成污染。杂草潜种群阶段的土壤种子库, 规模巨大, 是发生杂草危害的根源^[4], 其大小、种类组成以及结构特点决定了未来田间杂草的发生状况。据张朝贤^[5]统计, 在现有防治水平下, 我国农田中每年由于杂草危害造成的直接经济损失高达978亿元。例如, 直播稻田的杂草稻、千金子等发生严重; 小麦主产区的日本看麦娘、猪殃殃等杂草对麦田主要除草剂已产生了抗药性。我国目前面临着农田杂草发生面积不断扩大以及抗药性杂草大量发生的严峻形势。因此, 在进行农业生产时必须准确了解杂草种群及其变化规律, 以便于对其进行有效管理, 避免杂草的恶性化。

需要指出的是, 传统的农业管理观念和技术注重杂草防除而忽视了其对生态环境的积极作用, 在目标上追求经济效益而忽视生态效益, 因此, 以往人们较多关注杂草的负面影响, 相关的研究也主要集中在农田杂草的防控, 而农田杂草的防控又主要依靠化学防治, 即除草剂的使用。然而, 在除草剂残留问题的日益突出、杂草抗药性不断增强以及农田生态环境的持续恶化的现实下, 有效维持农田杂草的生物多样性逐渐为人们所重视^[6-8]。研究证实, 丰富的农田杂草多样性对于促进土壤养分循环、提高化肥利用率, 保持土壤动物、微生物的数量, 减少土壤流失、减轻酸化, 调节农田土壤生态系统具有重要作用^[6-9]。Tilman等^[10]提出的生物多样性越高, 生态系统越稳定、生产力越高的假说逐渐得到大多数生态学家的认可。冯伟等^[11]认为农田杂草土壤种子库多样性可能与农田生态系

统的生产力及其稳定性相关联。那么, 在人为驱动下向单一化方向发展的农田生态系统中, 如何协调杂草生物多样性与杂草危害的关系, 达到农田生态系统高生产力与高稳定性的平衡, 就成了研究的热点。

农田生态系统是陆地生态系统的重要组成部分, 占全球陆地面积的10.5%, 且受到强烈的人为干扰, 其中养分管理是一项重要的干扰因素。合理的养分管理可以改善土壤养分状况, 不仅影响作物植株养分的吸收与分配, 同时也能作用于杂草, 影响农田杂草种群的变化。国内外的研究发现, 农田养分管理可显著影响农田杂草生长以及其土壤种子库的密度、物种组成以及多样性等特征^[2, 3, 8, 9, 11-13]。因此, 如何科学进行农田养分管理, 使之既能维持较高的土壤肥力以满足作物优质高产的需求, 又能调控农田杂草种群, 保持一定的杂草生物多样性, 维持农田生态系统的平衡, 已成为实现农业可持续发展需要关注的问题。为此, 作者初步总结了农田养分管理与杂草的关系的相关研究进展, 讨论了存在的问题, 并从农田杂草的重点防控对象、农田优势杂草种群和竞争临界期的确定以及杂草的生态化学计量学特征等方面对杂草生态防控对策进行了分析; 在此基础上, 作者提出了营养调控假设, 期望为制定农田杂草综合管理策略以及保护农田生态环境提供新的思路。

1 养分管理与农田杂草的关系

1.1 优势杂草物种组成

农田养分管理可以改变杂草生长的自然环境以及养分、光照、空间等资源的可利用形式, 影响杂草种群自然演变和迁移过程, 形成不同优势杂草物种组合的杂草群

落。尹力初等^[14]的田间试验结果表明，P素是影响杂草种类发生的关键营养因素，而N素是决定优势杂草群落的主要营养因素，在NPK配施和未施肥处理中仅发现止血马唐（*Digitaria ischaemum* Muhlenb）为优势杂草；在NP和PK配施处理中香附子（*Rhizoma Cyperi*）为优势杂草；在NK处理中止血马唐与芦苇（*Phragmites communis* Trin）为优势杂草。Bittman等^[15]研究认为N、P对牧场草类组成影响较大，S对其组成及产量影响也很大，而K的影响则较小或几乎没影响。Davis等^[16]研究表明长期施全量氮肥田块的土壤种子库以洋野黍（*Panicum dichotomiflorum*）等禾本科杂草为优势杂草，而施减量氮肥田块的土壤种子库以藜（*Chenopodium album*）为优势杂草。Blackshaw^[17-18]的研究指出杂草对养分响应差异及因此导致的竞争力差异将直接导致群落结构发生变异，养分管理模式可以改变物种组成和减少杂草密度。

目前，虽然某种具体土壤养分对杂草种群物种组成的影响尚无定论，但可以肯定的是农田养分管理可以影响田间优势杂草的物种组成，而优势杂草的组成又决定了杂草防除时间、防除手段、防除技术的选择。因此，只有了解优势杂草对养分管理的响应规律及其机制，才能有效进行农田施肥，科学制定杂草综合管理策略。

1.2 杂草种群密度

通过合理的农田养分管理可以改善杂草与作物之间的相互关系，形成杂草生境的多样化，限制对某一生境有着良好适应性杂草种类的生长，可以降低杂草的密度。Everaats等^[19]指出土壤中的N和K素是诱发杂草种子发芽并影响高杂草密度的关键因素。赵锋等^[20]的研究表明长期不同施肥模式下红壤稻田施P素是导致农田杂草总密度变化的原因之一。施林林等^[21]研究表明N、P养分的丰缺决定了太湖地区稻麦轮作田间杂草密度和优势种群，典型表现为缺N提高了豆科杂草的种群密度，富P提高了禾本科杂草密度。Blackshaw等^[22]指出冬小麦地农田杂草土壤种子库以堆肥和撒播化肥处理中最大，其次为新鲜粪肥，以地下N肥深施处理的杂草种子库最小。万开元等^[12]研究显示冬小麦地杂草土壤种子库的密度按NP>NPK>NK>CK>PK顺序依次递减。可以看出，土壤中的N、P、K等养分含量影响杂草的密度，虽然这些结论并不完全一致，但至少可以反映出具体地点上杂草种群变化过程中的某个阶段性特征。

1.3 杂草生物量

杂草种群的总生物量与杂草个体生物量以及密度关系密切。不同种类杂草的耐瘠薄能力不同，各自需肥特性也存在差异^[23]。Kandasamy等^[24]研究认为仅施N处理时杂草干物质量最高，其次为N、P配施处理，NPK（无论是有机肥或无机肥配施）处理和未施肥处理时杂草干物质量则相对较低。Blackshaw等^[22]认为撒施无机肥或施堆肥处理的杂草密度及干物质量均较高，其次为新鲜粪肥，未施肥处理的杂草密度和干物质量最低。侯红乾等^[25]研究指出在冬小麦全育生长期，与不施肥处理相比，单施N肥增加了杂草的密度和生物量，单施P肥也使得田间杂草生物量的增加了约44%。娄群峰等^[26]研究指出N肥施用量的多少在作物生长前期不会影响杂草的种类和密度，而在后期将影响杂草的密度与生物量。不同养分管理模式杂草的总生物量差异明显，而杂草的生物量直接影响作物生长。因此，准确了解杂草生物量对养分管理的响应将有利于对农田杂草的科学管理。

1.4 生物多样性

多样性是生物群落的重要特征之一，杂草群落的生物多样性影响着农田生态系统的稳定，逐渐引起专家和学者的关注。Wan等^[9]认为，土壤的N、P、K营养都能同时影响杂草种群的物种多样性和种群均匀度；随着N肥施用量的增加，杂草种群物种丰富度、物种多样性以及种群均匀度显著下降，而种群优势度显著上升。冯伟^[24]等在太湖地区对稻-油轮作田表层（0-15厘米）杂草土壤种子库进行调查，发现不同施肥措施下杂草群落中的物种数不同，单施化肥区杂草种类最少；无肥区和秸秆区的杂草种子库物种丰富度和Shannon-Wiener多样性指数均显著高于常规区和化肥区，但其Simpson多样性指数显著低于后者。潘俊峰等^[27]研究表明，长期有机-无机肥配施处理的物种多样性和均匀度指数维持在休闲与纯化肥处理区之间。而Bakker^[28]在研究中发现杂草物种多样性与土壤能提供的肥力资源相关，通过杂草对土壤肥力的竞争可以有效控制一些恶性杂草的发生。因此，研究不同养分管理模式杂草种群的生物多样性特征及其变化机制，可以为农田杂草的多样性保护提供参考。

从上面分析可以看出，国内外以往的研究重点是不同养分管理模式农田杂草的种群动态特征^[12, 14, 15, 19, 24, 29]。结果表明，农田杂草种群在不同养分管理模式具有明显的差异性，土壤N、P、K是影响农田杂草的主要因素^[9, 14, 19, 22, 23]。这些研究主要从施肥与轮作、耕作等结

合的角度来考察农田杂草的响应,很少涉及影响机制,由于研究环境条件的差异,国内外得出的研究结论也并不统一。事实上作物、土壤、气候、除草剂等都可能影响或者掩盖养分管理对农田杂草的作用,因此,仍有许多问题需要进一步探讨。主要包括:(1)竞争理论与杂草防控。物种竞争是塑造植物形态和生活史的主要动力之一,也是决定种群组成、结构与动态的重要因素。如何在资源竞争理论的指导下研究提出合理的杂草防控措施已成为杂草学家和生态学家需要共同面对的难题之一。(2)杂草的生态化学计量学。生态化学计量学研究植物的C、N、P计量关系与植物个体生长发育、种群增长、群落动态和生态系统过程的联系,它已成为生态学研究的前沿领域之一,但目前很少应用于杂草学的相关研究。(3)杂草种群变化的连续性。关于养分管理引起农田杂草种群特征变化的规律及其形成机制目前尚无一致的结论。最主要原因是未能获得种群变化的连续性资料数据,现有资料往往只能反映具体地点上杂草变化过程中某个阶段的特征。

2 农田杂草防控对策分析

2.1 农田杂草防控的重点对象是优势杂草

杂草群落演替已经成为我国杂草成灾的主要原因^[30],而农田杂草防控的重点对象是优势杂草,杂草综合管理亦主要针对田间优势杂草^[31]。农田的优势杂草不仅在生长、繁殖、成熟、传播等生物学特性方面有着广泛的适应性,还可能向周围环境释放化感物质以影响其他植物种子萌发,抑制或排斥其他植物的生长发育,从而使自身迅速蔓延生长。优势杂草在杂草种群中占据绝对的竞争优势,必然会妨碍其他杂草的生长,特别是影响作物的产量和品质。例如,旱地优势杂草之一的豚草(*Ambrosia artemisiifolia*),其吸水吸肥能力和再生能力极强,消耗大量的养分,导致作物大幅度减产。张葵等^[32]发现在玉米地豚草密度达30-50株/平方米时,玉米减产30%-40%,当豚草数量增加到50-100株/平方米时,玉米几乎是颗粒无收。在大豆田中,当豚草数量增加到116株/平方米时,大豆减产12%。

2.2 农田优势杂草种群和竞争临界期的确定

研究杂草与作物竞争关系的目的是确定农田优势杂草种群和竞争临界期,为有效防控杂草提供依据。当杂草生长存留对作物产量的损失和无草状态下作物产量增加量相等时即为杂草竞争临界期。作物与杂草竞争临界期的确定

一般是在试验时设计有草、无草、在作物不同生长期除草后保持无草等处理,测定不同除草时间与作物损失率的关系,从而确定临界期。杂草危害经济阈值是指作物增收效益与防除费用相等时的草害状况。只有当作物因杂草而产生的减产损失率高于杂草防治成本和杂草所提供的生态利益的总和时,除草才显得必要^[33]。竞争临界期的不同导致了经济阈值的差异,据此可划分主要与次要杂草种群,确定不同杂草的最佳防治时间,为有效防治杂草提供理论根据,在杂草防治中具有重要的实践指导意义。

2.3 杂草的生态化学计量学特征

植物的C、N、P生态化学计量关系与植物个体生长发育、种群增长、群落动态和生态系统过程联系紧密。研究表明,非生物环境可利用的N和P通常是限制植物生长的决定性因子,植物种群生产力(C的积累)在一定程度上也是由关键养分N、P的可利用量所决定的^[34-35]。土壤N和P含量在一定程度上调节着植物C:N和C:P比的大小^[36]。研究认为,N、P稀缺意味着C的相对过量,反之,N、P充裕意味着C的相对不足^[37]。植物体的N:P可用来表征植物受N、P养分的限制格局^[38-39]。土壤养分限制和植物群落物种组成更替的关系非常密切,在养分梯度上任何一点的养分限制大小,不仅依赖于物种的生物学特征,还依赖于为满足植物最大的潜在生长率所需要养分的丰富程度^[40-41]。因此,同一区域上不同养分元素的限制作用,不但对植物种类的生态特征具有重要影响,也对群落的物种组成特征具有极强的选择作用^[42-43]。

目前植物生态化学计量学研究主要集中在区域性尺度的森林。例如,温带和北方森林生产力受N限制,而热带雨林和亚热带常绿林生产力普遍受到P的限制^[35, 38]。在同一区域的不同地点,由于生境差异、植被生活型不同、演替阶段的差别以及人类干扰强度的不同,N、P养分的限制格局也可能不同^[38, 44],不同功能类型的植物也会采取不同的适应策略^[45]。杂草的生态化学计量学研究刚刚起步,林新坚^[46]等研究表明杂草植株的C/N、C/P、N/P与土壤C/N、C/P、N/P及生物量呈一定的显著相关,施肥处理降低了杂草C/N与C/P,尤其是NPK+牛粪施肥处理。他同时也指出一定程度上也影响了冬闲期杂草的种群与C、N、P计量学特征,然而冬春季杂草C、N、P含量及其计量比能否作为表征农田土壤肥力的敏感指标,还有待进一步研究。这让我们有一些思考:不同养分管理模式下的农田杂草养分限制格局是怎么样的?优势杂草的生态化学计量学特征对养分管理的响应又是如何?准确回

答这些问题将有利于了解农田杂草种群的变化过程和科学制定杂草综合管理策略。

3 展望

基于不同的农田养分管理模式下杂草种群的优势杂草物种组成、密度、生物量及生物多样性有着显著性差异的认识,且综合考虑农田杂草的重点防治对象、作物与杂草的竞争关系,笔者提出土壤营养调控假设,即:通过农田养分管理来改善土壤肥力状况,调控农田杂草的种间和种内竞争关系,控制农田杂草种群结构与杂草生物量,同时

兼顾作物产量与杂草生物多样性,达到维持农田生态系统平衡的目标。

总之,当前对于不同养分管理下杂草以及杂草种群的变化过程知之甚少,而这些往往又与杂草的防控和农田生态系统的稳定密切相关。因此,通过以上的分析,作者认为应当在竞争理论和生态化学计量学方法的指导下,开展农田养分管理对农田杂草的影响及其作用机理研究,以期阐明农田养分管理对杂草种群变化过程的影响机制,为制定杂草综合管理策略以及保持农田杂草生物多样性、保护农田生态环境提供新的思路。

参考文献

- [1] [1] 强胜. 杂草学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [2] 古巧珍, 杨学云, 孙本华, 等. 不同施肥条件下黄土麦地杂草生物多样性 [J]. 应用生态学报, 2007, 18(5):1038-1042.
- [3] 南维鸽, 李世清, 侯红乾, 等. 不同施氮水平和杂草清除时间对半湿润地区农田氮素利用及产量的影响 [J]. 西北农业学报, 2007, 16(5):124-130.
- [4] 魏守辉, 强胜, 马波, 等. 土壤杂草种子库与杂草综合管理 [J]. 土壤, 2005, 37(2):121-128.
- [5] 张朝贤. 农田杂草与防控 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2011.
- [6] Chen X, Tang J J, Fang Z G, et al. Effects of weed communities with various species numbers on soil features in a subtropical orchard ecosystem [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2004, 102(3):377-388.
- [7] Yang Y S, Wang H, Tang J J, et al. Effects of weed management practices on orchard soil biological and fertility properties in southeastern China [J]. Soil & Tillage Research, 2007, 93(1):179-185
- [8] 李儒海, 强胜, 邱多生, 等. 长期不同施肥方式对稻油两熟制油菜田杂草群落多样性的影响 [J]. 生物多样性, 2008, 16(2):118-125.
- [9] Wan K Y, Tao Y, Li R H, et al. Influences of long-term different types of fertilization on weed community biodiversity in rice paddy fields [J]. Weed biology and management, 2012, 12(1):12-21.
- [10] Tilman D, Reich P B, Knops J M H. Biodiversity and ecosystem stability in a decade long grassland experiment [J]. Nature, 2006, 441:629-632.
- [11] 冯伟, 潘根兴, 强胜, 等. 长期不同施肥方式对稻油轮作田土壤杂草种子库多样性的影响 [J]. 生物多样性, 2006, 14(6):461-469.
- [12] 万开元, 潘俊峰, 李儒海, 等. 长期施肥对旱地土壤杂草种子库生物多样性影响的研究 [J]. 生态环境学报, 2010, 19(4):836-842.
- [13] Cauwer B D, Berge K V, Cougnon M, et al. Weed seedbank responses to 12 years of applications of composts, animal slurries or mineral fertilizers [J]. Weed research, 2010, 50(5):425-435.
- [14] 尹力初, 蔡祖聪. 长期不同施肥对玉米田间杂草生物多样性的影响 [J]. 土壤通报, 2005, 36:77-79.
- [15] Bittman S, McCartney D H, Waddington J, et al. Long-term effects of fertilizer on yield and species composition of contrasting pasture swards in the Aspen Parkland of the Northern Great Plains [J]. Canadian Journal of Plant Science, 1997, 77:607-614.
- [16] Davis A S, Renner K A, Gross K L. Weed seed bank and community shifts in a long-term cropping systems experiment [J]. Weed Science, 2005, 53(3):296-306.
- [17] Blackshaw R E, Semach G, Janzen H H. Fertilizer application method affects nitrogen uptake in weeds and wheat. Weed Science, 2002, 50:634-641.
- [18] Blackshaw R E, Molnar L J, Janzen H H. Nitrogen fertilizer timing and application method affect weed growth and competition with spring wheat. Weed Science, 2004, 52:614-622.
- [19] Everaarts A D. Responses of weeds to application of nitrogen, phosphorus and potassium on low fertility acid soils in Suriname [J]. Weed Research, 1992, 32:385-390.
- [20] 赵锋, 董文军, 芮雯奕, 等. 不同施肥模式对南方红壤稻田冬春杂草群落特征的影响 [J]. 杂草科学, 2009, 1:7-12.
- [21] 施林林, 沈明星, 蒋敏, 等. 长期不同施肥方式对稻麦轮作田杂草群落的影响 [J]. 中国农业科学, 2013, 46(2):310-316.
- [22] Blackshaw R E, Molnar L J, Larney F J. Fertilizer, manure and compost effects on weed growth and competition with

- winter wheat in western Canada [J]. *Crop Protection*, 2005, 24(11):971–980.
- [23] 张学友, 金丽华, 陈柏森, 等. 氮磷钾对杂草生长影响的研究 [J]. *西北农林科技大学学报*, 2003, 31(2):109–111.
- [24] Kandasamy O S, bayan H C, Santhy P, et al. Long-term effects of fertilizers application and three crop rotations on changes in the weed species in the 68th cropping (after 26 years) [J]. *Acta Agronomica Hungarica*, 2000, 48:149–154.
- [25] 侯红乾, 李世清, 南维鸽. 冬小麦播种密度和施肥方式对麦田杂草群落组成及生长的影响 [J]. *西北植物学报*, 2007, 27:1849–1854.
- [26] 娄群峰, 张敦阳, 黄建中, 等. 肥用量对三种杂草与油菜间竞争关系的影响 [J]. *南京农业大学学报*, 2000, 23(1):23–26
- [27] 潘俊峰, 万开元, 章力干, 等. 长期有机–无机肥配施对农田杂草土壤种子库的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(2):488–496.
- [28] Bakker J P. *Nature Management by Grazing and Cutting*. Dordrecht, The Netherlands:Kluwer Academic Publishers, 1989.
- [29] 蒋敏, 沈明星, 施林林, 等. 长期定位施肥对稻麦轮作农田土壤杂草种子库的影响 [J]. *中国农业科学*, 2013, 46(3):555–563.
- [30] 强胜. 2010. 我国杂草学研究现状及其发展策略. *植物保护*, 36(6):1–5.
- [31] O’ Donovan JT, Blackshaw RE, Harker KN, et al. 2007. Integrated approaches to managing weeds in spring-sown crops in western Canada [J]. *Crop Protection*, 2007, 26(3):390–398.
- [32] 张葵. 恶性杂草—豚草 [J]. *生物学通报*, 2006, 41(2):25–26.
- [33] 李永丰, 娄群峰, 李宜慰等. 江苏省小麦田间杂草的生态经济防治阈期 [J]. *江苏农业学报*, 2001, 17(4):219–222.
- [34] Niklas K J, Owens T, Reich P B, et al. Nitrogen/phosphorus leaf stoichiometry and the scaling of plant growth [J]. *Ecology Letters*, 2005, 8:636–642.
- [35] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101:11001–11006.
- [36] Hogan E J, Minnullina G, Smith R I, et al. Effects of nitrogen enrichment on phosphatase activity and nitrogen:phosphorus relationships in *Cladonia portentosa* [J]. *New Phytologist*, 2010, 186:911–925.
- [37] Güsewell S, Koerselman W, Verhoeven J T A. Biomass N:P ratios as indicators of nutrient limitation for plant populations in wetlands [J]. *Ecological Applications*, 2003, 13:372–384.
- [38] Wardle D A, Walker L R, Bardgett R D. Ecosystem properties and forest decline in contrasting long-term chronosequences [J]. *Science*, 2004, 305:509–513.
- [39] He J S, Wang L, Flynn D F B, et al. Leaf nitrogen:phosphorus stoichiometry across Chinese grassland biomes [J]. *Oecologia*, 2008, 155:301–310.
- [40] Daufresne T, Hedin L O. Plant coexistence depends on ecosystem nutrient cycles:extension of the resource – ratio theory [J]. *PNAS*, 2005, 102:9212–9217.
- [41] Miller T E, Burns J H, Munguia P, et al. A critical review of twenty years:use of the resource – ratio theory [J]. *The American Naturalist*, 2005, 165:439–448.
- [42] Andersen T, Elser J J, Hessen D O. Stoichiometry and population dynamics [J]. *Ecology Letters*, 2004, 7(9):884–900.
- [43] Gsewell S, Bailey K M, Roem W J, et al. Nutrient limitation and botanical diversity in wetlands:can fertilization raise species richness? [J]. *Oikos*, 2005, 109(1):71–80.
- [44] Davidson E A, de Carvalho C J R, Figueira A M, et al. Recuperation of nitrogen cycling in Amazonian forests following agricultural abandonment [J]. *Nature*, 2007, 447:995–999.
- [45] Aerts R, Chapin F S. The mineral nutrition of wild plants revisited:a reevaluation of processes and patterns [J]. *Advances in Ecological Research*, 2000, 30:1–67.
- [46] 林新坚, 王飞, 王长方, 等. 长期施肥对南方黄泥田冬春季杂草群落及其 C、N、P 化学计量的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(5):573–577.