

文雅琴,熊康宁,李 瑞,等. 秸秆还田效益的影响因素及其在喀斯特区的应用展望[J]. 江苏农业科学,2019,47(16):14-18.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.16.004

秸秆还田效益的影响因素及其在喀斯特区的应用展望

文雅琴,熊康宁,李 瑞,陈 海

(贵州师范大学喀斯特研究院/国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心,贵州贵阳 550001)

摘要:秸秆还田作为一种改善土壤结构及增加农作物产量的生态、经济、有效的农艺覆盖措施,被广泛地应用到农村地区的水土保持和农作物增产的工作中。喀斯特地区由于特殊脆弱的地质地貌自然背景,加上强烈的人为耕作活动,石漠化和水土流失问题十分严重,进而造成土地生产力下降,作物减产。坡耕地的水土流失占据了喀斯特地区水土流失极大的比例,秸秆还田农艺覆盖措施是水土保持工作中一种较为成熟的水土保持措施,它在一定的程度上改善了土壤结构,减少了降雨对地表的冲刷,径流量及泥沙量,增加了土壤微生物数量,起到了保水保土的作用,并且增加了农作物的产量。目前,对于喀斯特区秸秆还田方面的研究相对较少,本文总结分析了秸秆还田的生态、经济效益,并从秸秆还田量、秸秆还田深度、秸秆还田方式、耕作方式、施肥方式 5 个方面阐述了影响秸秆还田效益的因素,提出了秸秆还田研究中遇到的问题及展望,并将其进一步运用推广到喀斯特地区的秸秆还田工作中,以期对喀斯特地区水土保持,土壤通用侵蚀方程的修订,秸秆还田利用方式的优化配置与农作物产量的提高等提供一定的理论与借鉴作用。

关键词:喀斯特;秸秆还田效益;影响因素;展望

中图分类号: S157;X712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)16-0014-05

秸秆覆盖,即利用农作物秸秆覆盖地表,是水土保持工作中较为有效的耕作覆盖措施之一。近年来,研究发现秸秆还田极大地改善耕层土壤团粒结构,极显著地提高了表层总有机碳(TOC)含量^[1-3],增加了土壤肥力^[4-6],明显改善土壤侵蚀状况^[7-8]。该措施降低土壤侵蚀强度的作用机制主要是增加土壤表面的覆盖度,覆盖的作物秸秆削弱雨滴对土壤的冲刷,减轻雨滴对地表土壤团聚体的破坏,增加降雨入渗,从而减少地表径流及侵蚀速率。与裸地相比,秸秆覆盖能显著减少 73.9%~86.2% 的地表径流,降低 32.5%~66.6% 的径流总量,并极显著降低了 96.4%~98.1 土壤侵蚀总量达%^[9]。农业发展引发了西班牙某些地区严重的土壤退化和侵蚀,Garcia-Orenes 等在西班牙的研究表明,在秸秆覆盖 16 个月后,土壤有机碳含量、团聚体稳定性、微生物生物碳含量都有大幅度的提高,土壤流失量显著下降^[10]。Cerdà 等对地中海地区秸秆还田对土壤侵蚀的影响进行了研究,秸秆覆盖 1 年后,其减流减沙效果十分明显,径流量从 7.7% 降低到 5.9%,土壤侵蚀量明显降低;但是与传统的耕作方式相比,秸秆还田增大了近 1.9 倍的农田投入^[11]。如果政府不加大对农民的津贴补助,农民对秸秆还田的参与度与支持度将会明显降低,从而影响到秸秆还田的进一步推广应用。在我国农村地区,农民没有意识到秸秆还田的生态经济效益,大量的农作物秸秆都被农民焚烧,秸秆焚烧造成了农村地区空气的严

重污染,作物秸秆得不到有效利用,资源严重浪费。为使秸秆还田农艺覆盖措施得到更加广泛的利用推广,必须加大宣传力度,使农民意识到秸秆还田的重要生态、经济效益。对于贫困的喀斯特山区而言,经济效益是农民关注的首要问题。秸秆还田量、秸秆还田方式、秸秆还田深度、耕作方式、施肥方式等因素会对秸秆还田的效益产生极大的影响,探明这些因素对秸秆还田效益的作用机制,对于提高秸秆利用效率,最大程度地改善土壤理化性质,提高农作物产量具有十分重要的现实意义与理论意义。喀斯特坡耕地地区由于其特殊的地质地貌背景,大量的碳酸盐广泛分布,加上人类耕作活动的干扰,生态环境十分脆弱,极易发生水土流失。喀斯特坡耕地地表岩溶带和孔洞发育,易径流入渗,地表径流系数小^[12]。岩溶区溶蚀孔隙、裂隙、管道等发育使水土流失不易察觉,具有隐蔽性,同时土壤短距离丢失和地下漏失现象普遍存在^[13-15],地貌类型在宏观上控制区域的侵蚀特征^[16]。从目前贵州省坡耕地水土流失治理现状来看,仍主要以国家坡耕地水土流失综合治理专项为主,但国家治理专项投资有限,加之区域坡改梯难度大,使得目前治理范围较为有限^[17];因此,秸秆还田具有十分重要的意义。相关研究表明:秸秆还田是一种保水保土及提高作物产量的经济、可行的方式^[18-19]。秸秆还田被广泛地应用到农村地区,分析其水土保持效益、对作物增产的作用,探明它发挥水土保持作用以及提高土地生产力的机制,对于人们进一步认识农村地区秸秆还田的重要性,进一步推广利用秸秆还田及对秸秆还田利用方式的探索有重要的促进作用。

本文通过总结分析秸秆还田的生态、经济效益及其影响因素,阐明秸秆还田未来的研究方向及亟需解决的关键问题,以期将这些理论体系运用于特殊的喀斯特坡耕地地区,为喀斯特坡耕地地区的水土保持以及农作物增产工作提供一定的理论依据。

收稿日期:2018-05-05

基金项目:贵州省研究生教育创新计划(编号:黔教研合 GZS 字[2016]04 号);国家自然科学基金(编号:3176030121)。

作者简介:文雅琴(1993—),女,湖南常德人,硕士研究生,主要从事石漠化治理与水土保持研究。E-mail:1040699485@qq.com。

通信作者:熊康宁,硕士,教授,博士生导师,主要从事喀斯特地貌与洞穴、世界自然遗产、石漠化治理研究。E-mail:xiongkn@163.com。

1 秸秆还田效益的影响因素

1.1 秸秆还田深度对秸秆还田效益的影响

秸秆还田深度会对土壤养分和物理性状产生极大的影响,探索适宜的秸秆还田深度有利于提高秸秆利用率,并最大限度地改善土壤理化性质。农作物秸秆深还到土壤耕层以下时,其秸秆的分解率远高于秸秆免耕覆盖的分解率,使秸秆中的纤维类物质与深层土壤充分地混合,激发了土壤微生物活力,进而提高土壤酶的活性,促进了土壤中的营养元素更高效地被农作物吸收;同时,残留在土壤中秸秆的木质素类物质,能扩充土壤碳库的容量^[20]。以往的秸秆还田技术多数将秸秆翻压在土壤表层,很少能达到 20 cm 深处。但是,土壤表层氧化条件好,秸秆矿化和腐殖化速度都快,最终,土壤有机质含量的增减程度决定于土层所处的生态条件,有机质含量是土壤生态平衡的结果。大量农作物是深根系的农作物,因此为提高秸秆还田效益,需要进行深度秸秆还田。任晓明等的研究表明,综合黄棕壤物理性状和养分含量,秸秆还田深度为 20 cm 的处理最为适宜^[21]。矫丽娜等的研究表明:对于等量的秸秆还田量,当秸秆还田深度从 0 cm 增加到 20 cm 再增加到 40 cm 时,随着土层深度的增加,土壤中的有机质含量增加^[22],其原因是表层土壤通气性高,秸秆分解以 CO_2 形式释放,较深土层由于通气性较低分解转化变缓,更利于有机质的积累,研究结果为深度秸秆还田促进有机质的积累提供了理论依据。

1.2 秸秆还田量对秸秆还田效益的影响

秸秆还田会对土壤有机质的提升、土壤结构的改善及农作物产量的提高产生一定的积极作用,但秸秆还田的生态、经济效益是否会随着秸秆还田量的增加而增加,尚未形成统一的结论。大量研究表明,高量秸秆还田与中低量秸秆还田相比,对土壤总有机碳含量和增加活性有机碳组分以及碳库管理指数的影响等方面有显著优势,主要因为秸秆还田量过高会导致土壤碳氮比失衡,土壤中没有足够的氮素供微生物繁殖生长,降低了土壤微生物的数量和活性,从而导致秸秆腐解率降低^[23-25]。Yang 等的研究表明:秸秆还田对土壤水分渗漏有影响,但这种影响与秸秆埋藏的深度无关,只与秸秆还田量的大小有关,说明秸秆还田量与土壤水分渗漏的量有一定的相关性^[26]。秸秆还田深度与秸秆还田量都与氮淋失量存在着一定的相关性。秸秆还田量及还田深度会对水稻的高度、产量、相对叶绿素含量(SPAD 值)产生影响,但小麦产量与秸秆还田深度之间没有相关性,只与秸秆还田量间存在着一定的相关性。上述研究说明,作物品种的差别会影响到秸秆还田的效果,相同的秸秆还田深度或秸秆还田量对于不同的作物会产生不同的效果。因此,为了获取某种土地利用类型上的最佳秸秆还田深度和最佳秸秆还田量时必须考虑到种植农作物的类型。

1.3 不同秸秆还田方式对秸秆还田效益的影响

秸秆还田方式的差异会对土壤呼吸、土壤钾素平衡、微生物多样性、农作物水分利用效率、土壤酶活及土壤各种理化性质等都会产生极大的影响。Beggy 等在美国亚利桑那州开展了小麦秸秆还田覆盖试验,采取了无覆盖、小麦秸秆粉碎混入表层土、秸秆覆盖在地表这 3 种处理,同时设置了粗糙和光滑

2 种地表粗糙度,土壤流失采用侵蚀针法进行估测;试验结果显示,表层土覆盖秸秆的光滑地表可有效控制杂草和降低土壤侵蚀风险^[27]。Ma 等的研究表明:秸秆还田会对稻田 CH_4 及 N_2O 这 2 种温室气体的排放产生一定的影响,秸秆还田方式的变化会使其排放量发生一定的变化,秸秆还田能提高农作物产量,但不同秸秆还田方式对农作物产量提高的效果差异并不显著^[28]。解文艳等在探明了秸秆粉碎还田、秸秆覆盖还田、过腹还田这几种不同的秸秆还田方式对农作物产量及耕层土壤钾素平衡的影响,发现秸秆过腹还田是维持土壤钾素平衡、保证土壤钾素肥力稳定的最佳秸秆还田方式^[29]。不同秸秆还田方式均能显著提高和田沙化土壤微生物活性和功能多样性,但不同方式的增效不同,相比于秸秆直接粉碎还田,秸秆过腹还田和炭化还田的效果较好,并降低了土传病害的风险^[30]。不同区域的最佳秸秆还田方式存在差异,喀斯特区具有地理环境的特殊性,在未来的研究与应用中,研究者需要对不同的秸秆还田方式对比分析,筛选出特定立地条件下的最佳秸秆还田方式。

1.4 秸秆还田配施化肥对秸秆还田效益的影响

钾、氮是作物生长必需的营养元素,土壤钾素、氮素含量是影响作物产量和品质的重要因素。大量研究表明,秸秆还田可以部分承担化肥钾、化肥氮的功能,减少大量施用化肥造成的土壤板结等不良的生态危害。秸秆还田可以减少钾肥的施用量,秸秆还田配施少量化学钾与单施秸秆钾相比,对农作物的增产效果最明显,这表明了秸秆还田配施一定量的化肥是一种有效促进农作物增产的生态农艺措施^[31]。秸秆的碳氮比高,在分解初期往往导致土壤有效氮被生物固定,加剧了其与作物对氮素的竞争。因此,为了满足提高作物生产、保证农作物的正常生长、满足农作物对于氮肥的需求量和改善土壤功能的双重目的,氮肥与秸秆配合施用在农业生产中具有广泛的应用潜力。

李亚鑫等的研究表明:与不还田相比,秸秆还田的土壤硝态氮的平均值呈增加的趋势,但也存在着降低的情况,这可能是由于秸秆还田提高了农作物产量,从而增加了对硝态氮的吸收量,降低了土壤硝态氮的含量^[32]。在李玮等的研究中,相对秸秆移除,秸秆还田获得了高产的施氮量,其增量为 $51 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{年})$;无论是玉米还是小麦,与空白处理相比,秸秆还田如果要获得高产,必须施用更大比例的氮肥^[33]。秸秆还田可明显增强土壤有机养分的矿化,秸秆腐解也会释放出丰富的碳和氮、磷、钾等速效养分,但是秸秆的分解程度与氮肥的施用量有密切联系。因此,为了提高农作物的产量,在秸秆还田的过程中一定要配施一定量的氮肥。潘志勇等的研究表明:在不施用氮肥的情况下,秸秆还田会在作物生长的各个时期产生较多的 N_2O ,因为秸秆还田提供了较适宜的温度,有利于 N_2O 的形成,秸秆还田配施一定量的氮肥能够较好地起到减少土壤 N_2O 排放的作用,降低温室效益^[34]。墨西哥西北部小麦玉米轮作试验表明:不施氮肥时,秸秆还田的小麦减产 10.8%,秸秆还田配施一定量的氮肥时,农作物增产 0.7% ~ 10.2%^[35]。

1.5 不同耕作条件对秸秆还田效益的影响

不同耕作方式会对秸秆还田对土壤理化性质及农作物产量与品质的效益造成一定的影响,因此在秸秆还田的过程中

一定要考虑到农机和耕作技术。Kurothe 在印度西部开展了不同水土保持耕作措施野外定位观测试验,认为秸秆覆盖显著降低了土壤侵蚀风险,同时提高了作物产量,而免耕措施对土壤结构的改善作用较显著,垄作措施保水保土效益较好^[36]。张树兰对黄土高原传统耕作、免耕+秸秆覆盖、垄覆膜+垄沟裸露、垄覆膜+垄沟覆盖秸秆等不同耕作模式进行了试验,得出了免耕+秸秆覆盖保水能力最强、产量最高的结论^[37]。范艺宽等在豫南烟区对不同耕作深度下秸秆是否翻压对土壤团聚体数量与质量的影响进行了相应的研究,结果表明:耕作深度 30 cm 处粒径 <0.25 mm 的土壤团聚体含量要低于深度 20 cm 处的含量^[38]。薛斌等的研究表明:与传统耕作相比,传统耕作配秸秆还田、免耕和免耕秸秆还田显著降低了 <0.25 mm 粒级的含量,降幅分别为 24.86%、37.18%、37.59%^[39]。郭瑶等的研究表明:与等量秸秆翻耕相比,免耕秸秆还田最大限度地提高了玉米冠层大小,对玉米前后生育时期的生长发育动态关系调控效应最明显,明显地提高了玉米产量,增加了经济效益,且在免耕秸秆还田方式下,玉米的光能及水分利用率最高^[40]。这表明了秸秆还田及耕作方式都会对土壤团聚体组成产生一定的影响,提高团聚体的稳定性,并对农作物的生理特征产生一定的影响。赵亚丽等从作物的耗水特征及水分利用效率的角度,对比分析在不同的耕作措施下秸秆还田的生态经济综合效益,发现在秸秆还田的基础上深松或深耕是黄淮海地区适宜的耕作方式^[41]。刘世平等的研究表明:从省工节本、保持水土和提高地力的角度,可采用免耕秸秆覆盖或留高茬还田;从提高产量和地力的角度,宜采用稻季翻耕秸秆还田^[42]。在中国西北干旱盐渍土壤地区秸秆还田加上地膜覆盖以及单独的秸秆覆盖措施都会使土壤有机碳、生物碳及溶解碳在土壤表层的含量显著增加。并且秸秆覆盖加上地膜覆盖措施对于各种不同形态碳含量的增加效果更佳^[43]。这表明,在进行秸秆还田的过程中要结合其他的措施,单独的秸秆还田措施的效益可能远远低于复合的秸秆还田措施。例如,在秸秆还田的过程中,常常结合生物炭措施来增加其水土保持与农作物增产效益。

2 秸秆还田研究中的问题与展望

2.1 研究尺度的局限性

针对年际变化及不同环境应结合具体种植情况选择不同秸秆还田方式,因此,进行长期定位试验以及不同环境因素的多地点试验将作为秸秆还田下一步的研究重点^[44]。从地域上来看,我国秸秆还田的研究主要集中在西部地区 and 北部地区,对于西南喀斯特地区秸秆还田的研究相对较少。因此在下一步的研究中,应该要加强对西南喀斯特地区秸秆还田的研究,尤其是西南喀斯特坡耕地地区的秸秆还田研究。在温暖潮湿的地区,秸秆还田可能会通过在作物生长的早期延长土壤寒冷湿润的条件降低作物产量,但是在干旱和半干旱地区秸秆还田对作物的增产作用就很明显。因此,秸秆还田要依据地区特殊的地理条件,从不同的区域及区域尺度进行考虑。对于秸秆还田效益研究的时间尺度一般是短时段,随着时间尺度的延长,秸秆还田的效益会发生相应的变化,因此在下一步的研究中,要加强长时间的连续观测与试验。

2.2 秸秆还田技术水平不高

虽然农民对秸秆还田的认识水平有了明显提高,但秸秆还田的配套技术不到位,相应的副作用得不到有效控制,经济效益不高等问题将制约其进一步推广和应用。秸秆用于工业原料可转化大量废弃秸秆,代替化石能源,消除潜在环境污染,具有良好的经济效益。但在整个调查区域内秸秆作为工业原料的比例仍然很低,目前国内仍然缺乏秸秆还田饲用、转化为生物质能源的技术,因此需要进一步加大对秸秆利用技术的开发,提高秸秆资源的利用效率^[45]。从长远看,秸秆还田可改善土壤条件,有利于作物增产,但如果秸秆利用水平不高,会造成负面影响。还田时粉碎不彻底,覆盖不均匀,会影响作物出苗,增加整地除草难度和某些病虫害的发病率。如何提高秸秆还田水平,减轻还田后耕作难度和病虫害发病率,还需做进一步研究。需要进一步提高秸秆还田技术,减少秸秆还田的负面影响。

2.3 区域最佳秸秆还田量的确定存在困难

由于不同的的种植作物类型、土壤类型、耕作方式及气候条件等因素的差异,不同研究者得出的秸秆还田适宜量也不完全一致^[46]。在秸秆还田的过程中,秸秆还田量及秸秆还田深度都是需要关注的重点,秸秆还田量过少,则达不到相应的改善土壤理化性质以及作物增产的最佳效果,秸秆还田量过多则会造成相应的负面影响,因此在秸秆还田的过程中需要寻找最佳秸秆还田量,达到最佳的保水保土及作物增产效益。确定最佳秸秆还田量的科学阈值可以从秸秆还田生态经济效益的不同角度进行考虑。

2.4 秸秆还田的负面影响

土壤条件的改善会促进作物秸秆可能携带的病原体的发生与传播,但秸秆还田量的变化会使这种影响发生相应的转变,因此明确区域适宜的秸秆还田量对于控制秸秆还田病虫害的危害具有十分重要的现实意义。在我国长江中下游地区,稻麦轮作,小麦收获后大量麦秸直接还田对下茬作物水稻的生长就会产生负面效应,可以通过探索适宜的水肥管理措施来克服麦秸还田的负面效应^[47]。在南方水稻产区秸秆还田的过程中,秸秆还田会造成土壤中主要的重金属物质镉得不到转移,加剧土壤的重金属污染,因此在秸秆还田的过程中需要综合考虑耕作措施,使秸秆还田在改善土壤理化性质的过程中,降低其对土壤中重金属转移阻碍的负面作用^[48]。

2.5 秸秆还田方式的局限

秸秆还田的分解速率和养分分解的速度较慢,腐解时间较长,为农业生产带来了极大的不便。秸秆直接还田会存在很多负面影响,加入秸秆腐熟剂能够促进秸秆快速分解,并增加土壤中的养分^[49]。秸秆还田作为保护性耕作技术之一,对农业生产意义重大。秸秆促腐还田后对农田土壤肥力的影响机制及不同腐解剂对秸秆腐解的作用机制是值得注意的研究方向。单一的秸秆还田与秸秆不还田相比会造成农作物减产,但在配施一定量的氮肥之后,农作物的产量又会增加,且增加的幅度与氮肥的施加量存在着一定的正相关关系^[50]。试验表明,在秸秆还田的过程中,要注意结合其他的农艺措施。不同的耕作方式下,秸秆还田的效果有差异,根据特殊的立地条件,优化配置秸秆还田与耕作方式,使其生态经济效益最佳。

3 喀斯特坡耕地地区的秸秆还田研究展望

非喀斯特区秸秆还田的相关研究同样适用于喀斯特区,在中外文献中以喀斯特区为研究区进行秸秆还田方面的研究目前较少。由于在喀斯特坡耕地地区坡改梯工程的难度较大及国家政策倾向,喀斯特坡耕地地区只能在原有的基础上采取一定的措施来防治水土流失,提高农作物产量,因此秸秆还田覆盖措施在喀斯特坡耕地地区的研究具有重大意义。秸秆还田措施作为一种农艺覆盖措施,对于校正完善喀斯特地区的通用水土流失方程也具有重要的意义。近几年来对喀斯特坡耕地地区的研究相对缺乏且研究内容大都集中在地表及地下水流失特点及机制、喀斯特坡耕地的资源状况方面,但是对于喀斯特坡耕地水土流失阻控技术及其原理的研究还有待深入。秸秆还田作为一种喀斯特坡耕地地区水土流失阻控及提高农作物产量的农艺措施更需要进一步研究,尤其需要加强以下2个方面的研究:

3.1 注重秸秆还田生态、经济效益的同时,探讨区域最佳秸秆还田量

喀斯特区土壤相对贫瘠,为保证作物生长需要施加一定量的化肥。傅伟等的研究表明:喀斯特区,秸秆还田代替化学钾肥会在提高农作物产量的同时,维持钾素动态平衡,但对秸秆还田量有一定的要求^[51]。过量施用化肥,容易造成土壤板结,土壤板结使降雨入渗率下降,在大雨或暴雨情况下,顺坡流入集流池,形成超渗产流,造成喀斯特坡耕地地区严重的水土流失,因此在喀斯特坡耕地地区实施秸秆还田农艺措施,不仅可以缓解长期施用化肥造成的生态破坏,同时会提高农作物产量,改善土壤理化性质。今后的研究中,在加强喀斯特区秸秆还田对改善土壤理化性质的生态效益及作物产量提高的经济效益的同时,要重点研究不同研究角度下的区域最佳秸秆还田量。

秸秆还田量较少时,对土壤养分的增加以及加强降雨渗透的效果有限,达不到最佳水土保持效果;当秸秆还田量高于最佳秸秆还田量时,它的水土保持生态和经济总体效益就会相应地下降,因为超量的秸秆覆盖会使土壤缺氧,土壤微生物生命活动受限,并且增加细菌和虫害,造成农作物减产^[52]。因此,找到特定区域的水土保持最佳秸秆还田量对于保持喀斯特坡耕地地区最佳的水土保持以及作物增产的综合效益具有重要的现实意义。不同区域的自然地理条件不一样,因此其最佳秸秆还田量也不一样。确定秸秆还田量的科学阈值可以从不同的角度:对土壤理化性质的影响;对作物产量的影响;对土壤酶的影响及对土壤微生物的影响。蔡丽君等的研究表明,秸秆还田量与土壤酶活性之间存在密切的相关性,且土壤酶活性与土壤有机质含量存在着正相关关系。在作物不同的生长期,不同的秸秆还田量对不同种类酶活性的影响是不一样的。合理的秸秆还田方式对土壤理化、生物性状的改良潜力巨大,更能够增强土壤生态系统的稳定性和生物缓冲性,在农业生态中具有重要意义^[53-55]。

3.2 探明喀斯特区秸秆还田腐解速度机制

秸秆在土壤中的降解速度会对秸秆还田的效益产生重大的影响,一般情况下会在秸秆还田的过程中加入腐熟剂,加快其降解速度。韦红群等的研究表明,喀斯特区秸秆的腐解速

度大于非喀斯特区^[56]。探明影响喀斯特区秸秆还田腐解速度的机制将是喀斯特区秸秆还田下一步研究的重点。

参考文献:

- [1] 胡乃娟,韩新忠,杨敏芳,等. 秸秆还田对稻麦轮作农田活性有机碳组分含量、酶活性及产量的短期效应[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(2):371-377.
- [2] 张鹏,李涵,贾志宽,等. 秸秆还田对宁南旱区土壤有机碳含量及土壤碳矿化的影响[J]. 农业环境科学学报,2011,30(12):2518-2525.
- [3] 田慎重,宁堂原,王瑜,等. 不同耕作方式和秸秆还田对麦田土壤有机碳含量的影响[J]. 应用生态学报,2010,21(2):373-378.
- [4] 张亚丽,吕家珑,金继运,等. 施肥和秸秆还田对土壤肥力质量及春小麦品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2012,18(2):307-314.
- [5] 孙星,刘勤,王德建,等. 长期秸秆还田对土壤肥力质量的影响[J]. 土壤,2007,39(5):782-786.
- [6] 冀保毅,赵亚丽,郭海斌,等. 深耕条件下秸秆还田对不同质地土壤肥力的影响[J]. 玉米科学,2015,23(4):104-109,116.
- [7] Prosdoci M, Jordán A, Tarolli P, et al. The immediate effectiveness of barley straw mulch in reducing soil erodibility and surface runoff generation in Mediterranean vineyards [J]. Science of the Total Environment, 2016, 547: 323-330.
- [8] Gholami L, Sadeghi S H, Homae M. Straw mulching effect on splash erosion, runoff, and sediment yield from eroded plots [J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77(77): 268-278.
- [9] 林超文,罗春燕,庞良玉,等. 不同耕作和覆盖方式对紫色丘陵区坡耕地水土及养分流失的影响[J]. 生态学报,2010,30(22):6091-6101.
- [10] Garcia - Orenes F, Cerdà A, Mataix - Solera J, et al. Effects of agricultural management on surface soil properties and soil - water losses in eastern Spain. [J]. Soil & Tillage Research, 2009, 106(1):117-123.
- [11] Cerdà A, Rodrigo - Comino J, Giménez - Morera A, et al. An economic, perception and biophysical approach to the use of oat straw as mulch in Mediterranean rainfed agriculture land [J]. Ecological Engineering, 2017, 108: 162-171.
- [12] 陈洪松,杨静,傅伟,等. 桂西北喀斯特峰丛不同土地利用方式坡面产流产沙特征[J]. 农业工程学报,2012,28(16):121-126.
- [13] 张信宝,王世杰,孟天友,等. 农耕驱动西南喀斯特地区坡地石质化的机制[J]. 地球与环境,2010,38(2):123-128.
- [14] 彭韬,杨涛,王世杰,等. 喀斯特坡地土壤流失监测结果简报[J]. 地球与环境,2009,37(2):126-130.
- [15] 张喜,薛建辉,许效天,等. 黔中喀斯特山地不同森林类型的地表径流及影响因素[J]. 热带亚热带植物学报,2007,15(6):527-537.
- [16] 熊康宁,李晋,龙明忠. 典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题[J]. 地理学报,2012,67(7):878-888.
- [17] 李瑞,张弛,顾再柯,等. 贵州喀斯特区典型小流域坡面土壤侵蚀与主要影响因子的响应[J]. 水土保持研究,2018,25(3):1-5.
- [18] 汪军,王德建,张刚. 太湖地区稻麦轮作体系下秸秆还田配

- 施氮肥对水稻产量及经济效益的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(2): 265–270.
- [19] 孙瑞波, 郭熙盛, 王道中, 等. 长期施用化肥及秸秆还田对砂姜黑土细菌群落的影响[J]. 微生物学通报, 2015, 42(10): 2049–2057.
- [20] 韩锦泽. 玉米秸秆还田深度对土壤有机碳组分及酶活性的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.
- [21] 任晓明, 陈 繁, 陈效民, 等. 秸秆还田深度对黄棕壤养分及物理性质的影响[J]. 水土保持通报, 2018, 38(2): 58–64.
- [22] 矫丽娜, 李志洪, 殷程程, 等. 高量秸秆不同深度还田对黑土有机质组成和酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(3): 665–672.
- [23] 杨敏芳, 朱利群, 韩新忠, 等. 不同土壤耕作措施与秸秆还田对稻麦两熟制农田土壤活性有机碳组分的短期影响[J]. 应用生态学报, 2013(5): 1387–1393.
- [24] 蔡太义, 黄会娟, 黄耀威, 等. 不同量秸秆覆盖还田对土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响[J]. 自然资源学报, 2012, 27(6): 964–974.
- [25] 路文涛, 贾志宽, 张 鹏, 等. 秸秆还田对宁南旱作农田土壤活性有机碳及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(3): 522–528.
- [26] Yang H S, Xu M M, Koide R T, et al. Effects of ditch - buried straw return on water percolation, nitrogen leaching and crop yields in a rice - wheat rotation system[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2016, 96(4): 1141–1149.
- [27] Beggy H M, Fehmi J S. Effect of surface roughness and mulch on semi - arid revegetation success, soil chemistry and soil movement [J]. Catena, 2016, 143: 215–220.
- [28] Ma J, Ma E, Xu H, et al. Wheat straw management affects CH₄ and N₂O emissions from rice fields[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2009, 41(5): 1022–1028.
- [29] 解文艳, 周怀平, 杨振兴, 等. 秸秆还田方式对褐土钾素平衡与钾库容量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 936–942.
- [30] 顾美英, 唐光木, 葛春辉, 等. 不同秸秆还田方式对和田风沙土土壤微生物多样性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(4): 489–498.
- [31] 黄雪娇, 王 菲, 谷守宽, 等. 钾肥及与秸秆配施对紫色土作物产量和微生物群落结构的影响[J]. 生态学报, 2018(16): 5792–5799.
- [32] 李亚鑫, 张娟霞, 刘伟刚, 等. 玉米秸秆还田配施氮肥对冬小麦产量和土壤硝态氮的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(7): 38–44.
- [33] 李 玮, 乔玉强, 陈 欢, 等. 秸秆还田和施肥对砂姜黑土理化性质及小麦—玉米产量的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(17): 5052–5061.
- [34] 潘志勇, 吴文良, 牟子平, 等. 不同秸秆还田模式和施氮量对农田 CO₂ 排放的影响[J]. 土壤肥料, 2006(1): 14–16, 65.
- [35] Limon - Ortega A, Sayre K D, Francis C A. Wheat and maize yields in response to straw management and nitrogen under a bed planting system[J]. Semigroup Forum, 2000, 92(2): 295–302.
- [36] Kurothe R S, Kumar G, Singh R, et al. Effect of tillage and cropping systems on runoff, soil loss and crop yields under semiarid rainfed agriculture in India[J]. Soil & Tillage Research, 2014, 140: 126–134.
- [37] Zhang S L, Li P R, Yang X Y. Effects of tillage and plastic mulch on soil water, growth and yield of spring - sown maize [J]. Soil & Tillage Research, 2011, 112(1): 92–97.
- [38] 范艺宽, 毛家伟, 孙大为, 等. 耕作深度和秸秆还田互作对土壤团聚体组成和烟叶钾、氯含量的影响[J]. 河南农业科学, 2018, 47(1): 32–36.
- [39] 薛 斌, 黄 丽, 鲁剑巍, 等. 连续秸秆还田和免耕对土壤团聚体及有机碳的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 182–189.
- [40] 郭 瑶, 陈桂平, 殷 文, 等. 内陆灌区小麦秸秆还田对玉米光能利用及水分生产效益的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018(6): 847–855.
- [41] 赵亚丽, 薛志伟, 郭海斌, 等. 耕作方式与秸秆还田对冬小麦—夏玉米耗水特性和水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(17): 3359–3371.
- [42] 刘世平, 聂新涛, 戴其根, 等. 免耕套种与秸秆还田对水稻生长和稻米品质的影响[J]. 中国水稻科学, 2007, 21(1): 71–76.
- [43] Huo L, Pang H C, Zhao Y G, et al. Buried straw layer plus plastic mulching improves soil organic carbon fractions in an arid saline soil from Northwest China [J]. Soil & Tillage Research, 2017, 165: 286–293.
- [44] 徐莹莹, 王俊河, 王俊河, 等. 秸秆不同还田方式对土壤物理性状、玉米产量的影响[J]. 玉米科学, 2018(5): 78–84.
- [45] 王如芳, 张吉旺, 董树亭, 等. 我国玉米主产区秸秆资源利用现状及其效果[J]. 应用生态学报, 2011, 22(6): 1504–1510.
- [46] 葛立立, 王康君, 范苗苗, 等. 秸秆还田对土壤培肥与水稻产量和米质的影响[J]. 中国农学通报, 2012, 28(12): 1–6.
- [47] 贺 笑. 减缓麦秸还田对水稻生长负面效应的栽培技术研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2015.
- [48] 汤文光, 肖小平, 唐海明, 等. 长期不同耕作与秸秆还田对土壤养分库容及重金属 Cd 的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 168–176.
- [49] 胡 诚, 陈云峰, 乔 艳, 等. 秸秆还田配施腐熟剂对低产黄泥田的改良作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 59–66.
- [50] 黄婷苗, 郑险峰, 侯仰毅, 等. 秸秆还田对冬小麦产量和氮、磷、钾吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 853–863.
- [51] 傅 伟, 刘坤平, 陈洪松, 等. 秸秆还田替代化学钾肥对喀斯特峰丛洼地春玉米产量及土壤钾素的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(12): 1823–1831.
- [52] 徐蒋来, 胡乃娟, 朱利群. 周年秸秆还田量对麦田土壤养分及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(2): 215–222.
- [53] 蔡丽君, 张敬涛, 盖志佳, 等. 免耕条件下秸秆还田量对土壤酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(5): 1127–1132.
- [54] 靳红梅, 沈明星, 王海候, 等. 秸秆还田模式对稻麦两熟农田麦季 CH₄ 和 N₂O 排放特征的影响[J]. 江苏农业学报, 2017, 33(2): 333–339.
- [55] 孙小祥, 常志州, 靳红梅, 等. 太湖地区不同秸秆还田方式对作物产量与经济效益的影响[J]. 江苏农业学报, 2017, 33(1): 94–99.
- [56] 韦红群, 曹建华, 梁建宏, 等. 秸秆还田对岩溶区与非岩溶区土壤酶活性影响的对比研究[J]. 中国岩溶, 2008, 27(4): 316–320.