试验研究

水旱轮作条件下免耕土壤有机碳变化特征研究

何淑勤[1], 郑子成[2], 李廷轩[2], 宫渊波[1]

(1. 四川农业大学 林学院, 四川 雅安 625014; 2. 四川农业大学 资源环境学院, 四川 雅安 625014)

摘　要: 采用野外调查与室内分析相结合的方法,研究了水旱轮作条件下免耕土壤有机碳的变化特点。结果表明,水作及旱作后,随免耕年限延长土壤有机碳在免耕 5～6 a 达到最大值,与常规耕作差异显著;免耕 0—5 cm 土层有机碳显著高于其他土层,具有一定的表聚现象;水旱轮作条件下土壤富里酸含量略高于胡敏酸,土壤碳氮比在 10～16,有利于有机质矿化过程中养分的释放;有机碳密度与土壤有机碳变化趋势一致。研究水旱轮作免耕措施对土壤有机碳含量的影响,可为建立合理轮耕模式提供一定的理论基础,同时,也为该耕作方法的推广应用提供科学指导。

关键词: 水旱轮作; 免耕; 水稻土; 有机碳

文献标识码: A　　**文章编号**: 1000-288X(2012)01-0001-04　　**中图分类号**: S151

Change of Soil Organic Carbon Under No-tillage Paddy—Upland Rotation

HE Shu-qin[1], ZHENG Zi-cheng[2], LI Ting-xuan[2], GONG Yuan-bo[1]

(1. *Forestry College*, *Sichuan Agricultural University*, *Ya'an*, *Sichuan* 625014, *China*;
2. *College of Resources and Environmental Science*, *Sichuan Agricultural University*, *Ya'an*, *Sichuan* 625014, *China*)

Abstract: Change of soil organic carbon under no-tillage paddy—upland rotation was studied through filed investigation and laboratory analysis. Results showed that with the increasing years of no-tillage, the maximum soil organic carbon occurred 5 to 6 years after water-cultivation and dry-cultivation. The content of soil organic carbon under no-tillage was significantly different from that under conventional tillage. The content of soil organic carbon within 5 cm of the surface soil was obviously higher than that in other soil layers, suggesting a certain surface accumulation phenomenon. The ontent of fulvic acid was found to be higher than the content of humic acid after water-cultivation and dry-cultivation. Ratios of soil carbon to nitrogen were from 10 to 16, which is favorable to nutrient release during organic matter decomposition. Change in organic carbon density was the same as that in soil organic carbon. The study may clarify the effect of no-tillage practices on the content of soil organic carbon and provide a theoretical basis for building a reasonable crop rotation model and a scientific guidance for promoting the use of farming methods.

Keywords: **paddy—upland rotation; no-tillage; paddy soil; organic carbon**

土壤有机碳(SOC)是陆地生态系统中最大的有机碳库,全球土壤 SOC 总量高达 2 000 Pg[1],主要分布在土壤表层且与大气交换活跃,其蓄积量较小幅度的变动,都可导致 CO_2 等温室气体浓度的较大波动[2],进而影响全球气候变化[3]。人类干扰而导致的土地利用方式的改变是影响土壤有机碳动态变化的关键因素之一,其变化不仅直接影响土壤有机碳的含量和分布,还通过影响与有机碳形成和转化有关的因子间接影响土壤有机碳的平衡[4-5]。传统农地翻耕增强土壤侵蚀,导致土壤有机养分流失,加剧土壤退化,并带来严重的沙尘天气。免耕覆盖不仅能有效地抑制土壤水蚀和风蚀,防治土壤退化,而且还有利于土壤有机碳的积累和氮营养的积累,提高土壤团粒结构的碳和氮含量。土壤可以被看作是一种碳的源或汇,影响着大气中 CO_2 的浓度[6]。土壤有机碳是土壤肥力的重要物质基础,它对土壤肥力的作用不仅决定于其数量,而且也决定于其质量[7]。免耕是现代耕作技术的一项重要革新,较传统耕作而言,不但省时、省工,且能有效保持水土,具有良好的经济和生态效益[8-11]。目前该项技术已在世界上近 30 个国家得到

收稿日期:2011-03-30　　**修回日期**:2011-05-16

资助项目:"十一五"国家科技支撑计划项目"长江中上游西南山区退化生态系统恢复与重建技术研究"(2006BAC01A11); 四川省教育厅重点项目"低山丘陵区退耕地水稳性团聚体演变特征及其肥力效应"(07ZA059); 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室开放研究基金资助项目"水蚀过程中地表糙度演化特征及其与侵蚀的互动效应"(2008)

作者简介:何淑勤(1978—),女(汉族),陕西省商南县人,讲师,主要从事土壤生态与水土保持方面的研究。E-mail:angelhsq@163.com。

应用，面积达 9.80×10^7 hm^2，在我国也日益受到重视。近年来关于免耕国内外已开展了大量研究，但多以旱地为主[12-14]，涉及水旱轮作研究较少[15-16]。因此，本文选取了四川省名山县典型的水旱轮作区为研究对象，探讨在该免耕模式下土壤有机碳变化特征，以期为确定该区土壤肥力水平，建立合理的耕作制度提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

研究区域所在地茅河镇、黑竹镇隶属四川省名山县，位于川西平原西南边缘，地处东经 103°2′—103°23″，北纬 29°58′—30°16′，属亚热带季风气候区，既受西南季风的控制又受南支气流的影响，年平均降雨量为 1 519.9 mm，多年平均温度 15.5 ℃，年日照时数 1 053.5 h。属典型的缓丘平坝区，海拔 600～650 m。种植制度以水旱轮作为主，大春种植水稻，小春种植油菜。土壤类型为水稻土。

1.2 土样采集

在油菜成熟期(4 月下旬)和水稻收获期(9 月中旬)分别采集不同免耕年限(2～3，5～6，7～8，10 a 以上)的土壤样品，同时采集相邻田块常规耕作土壤样品作为对照。相同免耕年限选 5～7 个田块，每个田块内按 S 型布点，分别在 0—5，5—10，10—20 及 0—20 cm 土层采集相应的混合土样。供试土壤基本性质见表 1。

表 1 供试土壤耕层理化性质

年限/a	容重/(g·cm^{-3})		全氮/(g·kg^{-1})		速效氮/(mg·kg^{-1})		速效磷/(mg·kg^{-1})		pH 值	
	旱作	水作	旱作	水作	旱作	水作	旱作	水作	旱作	水作
CK	1.56	1.46	1.54	1.91	150.00	189.80	14.33	17.08	5.52	5.61
2～3	1.60	1.49	1.92	2.23	170.70	223.10	18.48	19.68	5.06	5.32
5～6	1.64	1.53	1.90	2.52	196.40	228.50	22.78	22.12	5.06	5.21
7～8	1.66	1.61	1.58	1.95	148.10	213.00	16.44	20.40	4.99	5.13
>10	1.50	1.38	2.35	2.48	171.00	223.40	18.13	19.85	5.13	5.20

1.3 测定项目与方法

土壤容重用环刀法，酸碱度用电位法(水∶土=2.5∶1)，有机碳用重铬酸钾氧化—外加热法，全氮用半微量开氏法，速效氮用碱解扩散法，速效磷用碳酸氢钠提取—钼锑抗比色法，腐殖质碳及组分测定用焦磷酸钠—氢氧化钠提取法[17]。土壤有机碳密度用公式表示为：

$$SOC_d = C\times B_D\times T\times(1-\delta)/100 \quad (1)$$

式中：SOC_d——土壤有机碳密度(kg/m^2)；C——土壤有机碳的平均含量(g/kg)；T——土层厚度(cm)，B_D——土壤容重(g/cm^3)；δ——直径 > 2 mm 的砾石含量(%)。

本文选用 Excel 2003 和 SPSS 13.0 统计软件进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同免耕年限土壤有机碳的变化

由图 1 可知，水作及旱作后免耕土壤耕层有机碳高于常规耕作，增幅分别为 12.44%～59.95%，0.46%～44.00%。随着免耕年限延长，呈先增加后降低再增加的变化特征。水作首次最大值出现在免耕 5～6 a，旱作在 2～3 a，分别为 32.98，29.14 g/kg，显著高于常规耕作土壤。免耕 7～8 a 降到最低值，旱作后仅略高于常规耕作土壤 0.17 g/kg。以往研究表明，随着免耕年限延长，土壤板结使土壤孔隙分布发生了变化，紧实度增加，耕层变浅，进入土层中的有机物减少所致[6]。而本研究表明，在免耕 10 a 后土壤有机质含量却又有所增加。由于作物生长受到不同程度的影响，农民自发对土壤进行了旋耕，导致土壤有机碳含量有所回升。水作与旱作相比，水作后土壤有机碳含量除免耕 2～3 a 外均高于旱作土壤，增幅为 1.16%～36.74%。其原因主要是水作期间淹水抑制有机质分解。

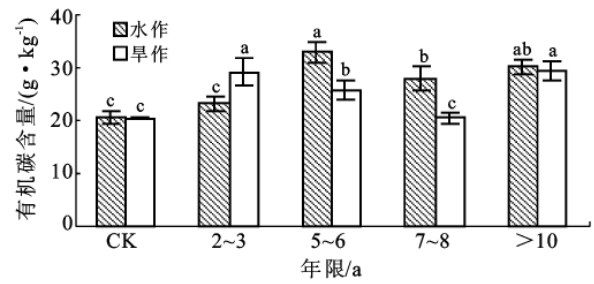

图 1 不同免耕年限土壤有机碳的变化

注：不同字母表示不同免耕年限间差异达 5%显著水平。下同。

土壤剖面有机碳的分布状况取决于成土过程的综合影响，包括有机质的来源及其进入。由表 2 可知，免耕土壤各土层有机碳含量高于常规耕作。其原因是常

规耕作条件下土壤被频繁扰动,有机物和土壤原有有机质的矿化分解要比免耕快。水作后,各层土壤有机碳含量在免耕 5～6 a 达到最大值,分别增加了 71.47%,59.48%,70.22%,显著高于常规耕作土壤。旱作后,0—5 cm 土层在免耕 10 a 后达到最大值,5—10 cm 及 10—20 cm 土层在免耕 2～3 a 达到最大值,各土层较常规耕作分别增加了 55.61%,45.65%,46.93%,差异显著。在土层分布上,随深度的增加免耕土壤有机碳含量迅速下降。水作及旱作后 0—5 cm 土层有机碳含量显著高于 5—10 cm 土层,分别高出 11.99%～32.16%,3.58%～30.95%;5—10 cm 和 10—20 cm 土层无明显差异。免耕土壤有机碳在土表(0—5 cm)富集,在常规耕作条件下,土壤有机碳在各土层分布较为均匀。这是由于免耕不扰动土层,面施有机肥料及作物残体进入下层的数量少。此外,长期连续免耕导致土壤耕层变浅,植物根系大量聚集表层,进入下层根系少也是又一原因。但在常规耕作条件下,耕翻使肥土相容,随耕作进入下层的有机物料较多。

2.2　不同免耕年限土壤腐殖质的变化

土壤腐殖质是土壤有机质的重要组成部分,其含量及组成决定土壤有机质的质量,在很大程度上影响土壤肥力。由表 3 可知,免耕水旱轮作条件下,随着免耕年限的延长,土壤腐殖质碳呈先降低后增加的变化趋势,水作方式下均高于翻耕,且旱作免耕 2～3 a 的土壤腐殖质碳显著高于 5～6,7～8 a。>10 a 水作免耕土壤腐殖质碳显著高于翻耕;土壤胡敏酸(HA)呈先增加,后降低,再增加的变化趋势,水作和旱作条件下不同免耕年限间均无显著差异;土壤富里酸(FA)呈先降低,后增加的变化趋势,水作和旱作条件下均高于翻耕,且水作除免耕>10 a 外,水作的 FA 均大于旱作条件;HA/FA 基本呈先增加后降低的变化趋势,水作和旱作条件下均低于翻耕,且水作除免耕>10 a 外,水作的 HA/FA 均大于旱作条件。

表 2　不同免耕年限各层土壤有机碳含量变化

耕作方式	土层/cm	有机碳含量/(g·kg^{-1})				
		CK	2～3 a	5～6 a	7～8 a	>10 a
水作	0—5	22.77c	25.03c	39.05a	33.98b	37.35a
	5—10	20.86d	22.35cd	33.26a	26.01bc	28.26b
	10—20	18.83d	23.06d	32.06a	23.54bc	27.39b
旱作	0—5	23.00c	30.56b	31.12b	25.56c	35.79a
	5—10	20.25c	29.50a	23.77bc	20.10c	28.06ab
	10—20	19.15c	28.13a	23.14b	19.27c	26.84a

表 3　不同免耕年限耕层土壤(0－20 cm)腐殖质的变化

免耕年限/a	腐殖质碳/(g·kg^{-1})		胡敏酸 HA/(g·kg^{-1})		富里酸 FA/(g·kg^{-1})		HA/FA	
	旱作	水作	旱作	水作	旱作	水作	旱作	水作
CK	0.70ab	0.50b	0.38a	0.39a	0.32b	0.18b	1.18	2.13
2～3	1.05a	0.75ab	0.20a	0.30a	0.83a	0.44ab	0.24	0.67
5～6	0.56b	0.70ab	0.31a	0.33a	0.37b	0.37ab	0.84	0.87
7～8	0.61b	0.68ab	0.27a	0.27a	0.34b	0.27ab	0.79	0.99
>10	0.86ab	0.82a	0.38a	0.43a	0.48ab	1.11a	0.80	0.39

胡敏酸是土壤腐殖质中的活跃物质,其组成、结构和性质的变化直接与土壤的保肥和供肥性质相关。本研究结果表明,免耕水旱轮作条件下 FA 含量略高于 HA,在一定程度上有利于 FA 的积累,这与蔡燕飞等[18]、唐晓红等[19]的研究结果一致。其原因在于土壤的环境条件决定着腐殖质的形成是以 HA 主,还是以 FA 为主。少水、通气性好的土壤不利于 FA 的淋溶淀积;相反,多水、通气性差则有利于使一些简单的移动性较强的 FA 淋溶淀积。水旱轮作表层土壤旱作季节多处于水少气多的状况,稻作期间处于淹水状态,由于淹水不仅引起 FA 的淋移,同时也促进了腐殖质的胡敏化作用,导致 FA 相对减少。但当水作免耕>10 a 后,出现 FA 增加的结果,一方面与当地土壤翻耕有关,另一方面随着水分过多,也阻碍了 HA 分子的进一步增长[19]。这也导致本研究不同耕作方式下 HA/FA 的变化特征。

土壤碳氮比通常被认为是土壤氮素矿化能力的标志。土壤的碳氮比与土壤利用方式、土壤耕作、施肥及土壤性质有着密切的联系,C/N 值大,腐熟程度高,分解慢,有利于土壤有机碳积累及有机无机复合体形成[20]。碳氮比低有利于微生物在有机质分解过程中的养分释放,土壤中的有效氮增加;反之,微生物在分解有机质的过程中会存在氮受限,从而与植物存在对土壤无机氮的竞争,不利于植物的生长及净初级生产力的增加。通常认为土壤碳氮比在 25～30 会出现净矿化,是微生物分解的最佳值。从图 2 可知,研究区不同免耕年限水作与旱作土壤碳氮比均介于 10～16,适合微生物矿化,即微生物在分解有机质的过程中不受氮限制,有利于分解过程中的养分释放,说明水旱轮作土壤腐殖化程度高,氮矿化能力强。植物

的枯枝落叶及有机质等集中在土壤表层，且土壤表层通气状况良好，有利于土壤微生物的活动与繁殖，免耕土壤没有机械拌和的过程，使土表集中了较丰富的基质，改善了表层土壤结构、通气状况和持水特性等，促进了土壤微生物的生长。

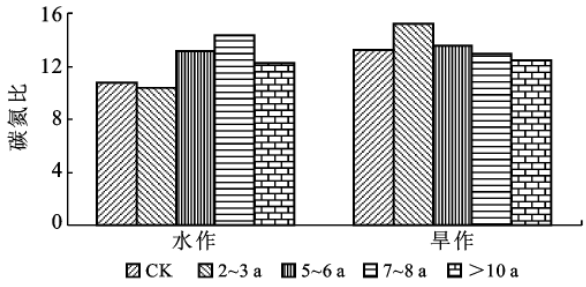

图 2 不同免耕年限耕层土壤(0－20 cm)碳氮比(C/N)的变化特征

2.3 土壤有机碳密度变化

由表 4 可知，水作有机碳密度首次最大值出现在免耕 5～6 a，旱作在 2～3 a，分别为 10.01 和 9.27 kg/m^2，显著高于常规耕作土壤。免耕 7～8 a 降到最低值，旱作后仅略高于常规耕作土壤 0.43 kg/m^2。其原因与有机碳变化的原因相同。有机碳密度与土壤有机碳变化趋势一致，表明实施免耕后土壤有机碳储量较常规耕作高。

表 4 不同免耕年限耕层土壤(0－20 cm)有机碳密度

免耕年限/a	水作		旱作	
	有机碳密度/(kg·m^{-2})	占对照百分数/%	有机碳密度/(kg·m^{-2})	占对照百分数/%
CK	6.01	100	6.35	100
2～3	6.88	115	9.27	146
5～6	10.01	145	8.43	133
7～8	8.95	149	6.78	107
>10	8.33	139	8.78	138

免耕水旱轮作土壤有机碳储量高于常规耕作。在不同利用方式下，土壤有机碳储量随土层深度变化的趋势和土壤有机碳含量变化趋势基本一致。因为大量死根的腐解归还为土壤提供了丰富的碳源，另一方面大量的地表枯落物也是表层土壤有机碳重要的碳源物质。此外，由于土壤中的有机碳主要分布在土壤表层，而人类的各种活动也主要作用于土壤表层，可见人类的各种活动方式对土壤中的碳必将产生深刻的影响，这也往往决定了土壤中的碳库是“源”或是“汇”的作用。可见，人为活动易于造成土壤碳的损失，因此，减少人为对土壤的干扰活动，加强对土壤的保护以维持和增加土壤碳储量，对维护全球气候变化，特别是减缓大气 CO_2 浓度上升等有着重要的意义。

3 结论

(1) 水作及旱作后，随免耕年限延长，土壤有机碳呈先增加后降低的变化趋势。免耕 5～6 a 达到最大值，与常规耕作差异显著，长期免耕导致土壤板结；免耕致使土壤酸化，且在免耕初期表现最为明显。水作及旱作后，免耕 0—5 cm 土层有机碳显著高于其他土层，表聚现象明显。

(2) 水旱轮作条件下土壤有机质活性增加通过周期性的水旱轮作换茬，可使土壤有机质的腐殖化和矿质化过程比例协调，从而提高土壤有机质的质量，水旱轮作使富里酸含量略高于胡敏酸。土壤碳氮比都介于 10～16，有利于分解过程中的养分释放，说明水旱轮作土壤腐殖化程度高，氮矿化能力强。

(3) 有机碳密度与土壤有机碳变化趋势一致，表明保护性耕作有机碳储量比常规耕作高。

[参 考 文 献]

[1] Janzen H. Carbon cycling in earth systems: a soil science perspective[J]. Agric. Eco-syst. Environ., 2004, 10(4): 399-417.

[2] 方精云. 全球生态学：气候变化与生态响应[M]. 北京：高等教育出版社，2000：58-76

[3] 金峰，杨浩，赵其国. 土壤有机碳储量及影响因素研究进展[J]. 土壤，2000，32(1)：11-17.

[4] Powers J S. Changes in soil carbon and nitrogen after contrasting land use transitions in Northeastern Costa Rica[J]. Eco-systems, 2004, 7(2): 374-381.

[5] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. Climate change 2001: the scientific basis: contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 22-37.

[6] 徐阳春，沈其荣，储国良，等. 水旱轮作下长期免耕和施用有机肥对土壤某些肥力性状的影响[J]. 应用生态学报，2000，11(4)：549-552.

[7] 江泽普，黄绍民，韦广泼，等. 不同免耕栽培模式对稻田土壤肥力的影响[J]. 中国农学通报，2007，38(1)：65-67.

[8] 沈宏，曹志洪，胡正义. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应[J]. 生态学杂志，1999，18(3)：24-26.

[9] 朱波，陈实，游祥，等. 紫色土退化旱地的肥力恢复与重建[J]. 土壤学报，2002，39(5)：743-749.

[10] 彭文英，张雅彬. 免耕对粮食产量及经济效益的影响评述[J]. 干旱地区农业研究，200，24(4)：113-118.

[11] 刘世平，张洪程，戴其根，等. 免耕套种与秸秆还田对农田生态环境及小麦生长的影响[J]. 应用生态学报，2005，16(2)：393-396.

(下转第 13 页)

小,起到物源补给的作用也相对较少。总之,研究区沿线泥石流源地物源分布的不均匀性造成了泥石流分布的不均匀性,这主要与研究区的气候条件、植被覆盖率、地形地貌及地层岩性有很大的关系。

(2) 地层岩性对研究区泥石流源地物源有影响,但是对松散固体物质的发育并没有起控制作用,地层岩性对物源分布的影响只有在其它环境背景条件具备的情况下才能产生。研究区西部寒冷、干旱的发育环境条件较适于浅层滑塌类发育,不利于深层、典型滑坡发育,泥石流源地物源多以小型滑坡、崩坡积及寒冻强风化残坡积物为主;研究区东部,气温升高,降水增加,利于深层滑动面的形成,也易于触发浅层滑坡发生,源地物源主要以沟道松散堆积物、寒冻弱风化残坡积物为。与地层岩性的相似,海拔高程、地形坡度对松散固体物质的发育也与其他环境背景条件及人类活动等密切相关。此外,由于研究区在藏东南高海拔地区,受海洋性季风气候的影响,冰川、冰湖发育,这些也可能会对泥石流源地物源的分布造成某种程度的影响。

[参 考 文 献]

[1] 吕儒仁,唐邦兴,朱平一. 西藏泥石流与环境[M]. 成都:成都科技大学出版社, 1999:1-216.

[2] Lina C W, Shieh C L, Yuan B D. Impact of Chi-Chi earthquake on the occurrence of landslides and debrisflows: example from the Chenyulan River watershed, Nantou, Taiwan[J]. Engineering Geology, 2004,71(1/2):49-61.

[3] 唐川,丁军,梁京涛. 汶川震区北川县城泥石流源地特征的遥感动态分析[J]. 工程地质学,2010,18(1):1-7.

[4] 李志林,朱庆. 数字高程模型[M]. 武汉:武汉测绘科技大学出版社, 2000:110-118.

[5] Barling R D, Moore I D, Grayson R B. Aquasi-dynamic wetness index for characterizing the spatial distribution of zones of surface saturation and soil water content[J]. Water Resource Research, 1994,30(4):1029-1044.

[6] 张彩霞. 基于 DEM 的地形湿度指数提取与应用研究[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2006.

(上接第 4 页)

[12] 黄高宝,李玲玲,张仁陟,等. 免耕秸秆覆盖对旱作麦田土壤温度的影响[J]. 干旱地区农业研究,2006,24(5):14-19.

[13] 张志国,徐琪,Blevins R L. 长期秸秆覆盖免耕对土壤某些理化性质及玉米产量的影[J]. 土壤学报,1998,35(3):384-391.

[14] López M V, Moret D, Gracia R, et al. Tillage effects on barley residue cover during fallow in semiarid Aragon[J]. Soil & Tillage Research, 2003,72(2):53-64.

[15] 高亚军,朱培立,黄东迈,等. 稻麦轮作条件下长期不同土壤管理对有机质和全氮的影响[J]. 土壤与环境,2000,9(1):27-30.

[16] 高明,李阳兵,魏朝富,等. 稻田长期垄作免耕对土壤肥力性状的影响研究[J]. 水土保持学报,2005,19(3):29-33.

[17] 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,1999:21-30.

[18] 蔡燕飞,章家恩,张杨珠,等. 稻作制度对红壤性水稻土有机质特征的影响[J]. 土壤,2006,38(4):396-399.

[19] 唐晓红,邵景安,高明,等. 保护性耕作对紫色水稻土团聚体组成和有机碳储量的影响[J]. 应用生态学报,2009,18(5):1027-1032.

[20] 刘淑霞,王宇,周平,等. 不同施肥对黑土有机无机复合及腐殖质结合形态的影响[J]. 南京农业大学学报,2008,31(2):76-80.