

王玉梅, 张雪华, 盛 虎, 等. 生态与常规种植对土壤养分、微生物及重金属的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(3): 361-367.

WANG Yu-mei, ZHANG Xue-hua, SHENG Hu, et al. Effects of ecological and conventional planting pattern on soil nutrients, microbes and heavy metals [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(3): 361-367.

生态与常规种植对土壤养分、微生物及重金属的影响

王玉梅¹, 张雪华^{2*}, 盛 虎^{2,3}, 陈能场^{4*}

(1. 四川大学建筑与环境学院, 成都 610065; 2. 南京大学(溧水)生态环境研究院, 南京 211200; 3. 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京大学环境学院, 南京 210023; 4. 广东省生态环境技术研究所广东省农业环境综合治理重点实验室, 广州 510650)

摘 要:为探讨生态种植模式对土壤环境的影响,以四川成都府南河上游地区安龙村生态农业和传统农业为研究对象,比较分析了生态种植与常规种植模式对土壤养分、微生物及重金属的影响。结果表明:除细菌含量外,生态种植的土壤中微生物碳含量及真菌、放线菌数量均高于常规种植,生态种植改善了土壤中微生物群落结构;生态种植土壤中重金属Cr、Pb、Hg和As含量均低于常规种植,Cd含量相差不大,生态种植带入的重金属较少;生态种植土壤中总氮、总磷、有效氮及有效钾的含量均高于常规种植,但总钾和有效磷的含量低于常规种植,这与两种种植方式下农业投入品不同密切相关。研究表明,生态种植能一定程度提升土壤养分,改善土壤微生物群落结构,并有效减少种植带入的重金属。

关键词:生态农业;传统农业;生态种植;常规种植;土壤养分;微生物;重金属

中图分类号:X171.3;S158 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2019)03-0361-07 doi: 10.13254/j.jare.2018.0202

Effects of ecological and conventional planting pattern on soil nutrients, microbes and heavy metals

WANG Yu-mei¹, ZHANG Xue-hua^{2*}, SHENG Hu^{2,3}, CHEN Neng-chang^{4*}

(1. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Lishui Institute of Ecology and Environment, Nanjing University, Nanjing 211200, China; 3. State Key Laboratory of Pollution Control & Resource Reuse, School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 4. Guangdong Key Laboratory of Integrated Agro-environmental Pollution Control and Management, Guangdong Institute of Eco-environmental Science & Technology, Guangzhou 510650, China)

Abstract: We compared the traditional agriculture and ecological agriculture in Anlong Village, which located near Chengdu, Sichuan, to compare the effects of ecological and conventional planting pattern on soil nutrients, microbes and heavy metals. The results showed: While the quantity of bacteria was lower, the quantity of microbial carbon, fungus and actinomycetes in ecological planting soil was higher than in conventional planting soil, which revealed the structure of microbial community got improved in ecological agriculture; The contents of heavy metal, such as Cr, Pb, Hg and As, were much lower in the soil with ecological agriculture, which indicated that the heavy metals brought by ecological planting were less; With ecological farming the contents of total nitrogen, total phosphorus, available phosphorus and available potassium in the soil increased, but the levels of total potassium and available phosphorus decreased, which were closely related to the different agricultural inputs. The quality of soil improved by transferring traditional agriculture to ecological agriculture in 3~10 years later. Furthermore, ecological farmers noticed that manure might cause the problem of heavy metals, so they used manure, biogas slurry as well as compost, which eased the heavy metal risk.

Keywords: ecological agriculture; traditional agriculture; ecological planting; conventional planting; soil nutrients; microbe; heavy metals

收稿日期:2018-08-07 录用日期:2018-09-05

作者简介:王玉梅(1993—),女,山西临汾人,博士研究生,主要从事生态农业、固废管理方向研究。E-mail:18328585431@163.com

*通信作者:张雪华 E-mail:xuehua0424@gmail.com;陈能场 E-mail:ncchen@soil.gd.cn

基金项目:江苏省科技计划项目(BK20140605)

Project supported: The Science and Technology Support Program of Jiangsu Province(BK20140605)

粮食安全是全球关注的焦点问题之一^[1]。过量施用化肥会导致土壤退化及其他相关的环境问题。为了缓解现代“石油农业”带来的环境问题,20世纪70年代以后出现了“替代农业”^[2],如有机农业、生态农业、可持续农业、自然农业等。与“石油农业”只强调经济效益不同,“替代农业”更强调农业生产中环境、经济和社会效益的可持续发展^[3-4]。

多个农场系统层次(Farm-system level)的研究显示,“替代农业”能增加土壤有机质含量,改善土壤化学、生物及物理特性^[5-9]。Wells等^[3]经过3年半的蔬菜种植试验发现,在使用堆肥代替化肥的系统中,土壤有机碳、微生物量、总氮、总磷、可交换阳离子及持水能力更高,团聚体的稳定性更好^[3]。Edmeades^[4]对比了14个使用化肥和农家肥的田间试验的长期研究(20~120年)发现,有机肥能够提高土壤有机质含量,增强土壤微生物活性。虽然大量的研究显示“替代农业”对土壤质量的维持和提高效果明显优于化肥,但由于农场系统层次的实验中不只有一个变量,因此很难解释引起土壤质量改变的真正原因。比如,有机农业系统中土壤有机质增加,可能是由于施用了大量农家肥,也可能是由于改变了作物轮作的方式^[4]。此外,20世纪90年代后期,人们开始关注畜禽粪便中的有害重金属问题。有研究指出,由于粪便中含有大量Cu、Zn、Cd、Pb、Cr、As,畜禽粪农用成为土壤和环境中重金属的重要来源之一,应谨慎使用^[10-11]。因此,农业管理方式与土壤质量的关系需要通过大量的田间试验来揭示。

本研究以四川省成都市府南河上游地区生态农业和传统农业为研究对象,旨在比较生态种植与常规种植模式对土壤养分、微生物及重金属的影响。该研究结果可为成都平原地区农户层面改变施肥结构带来的土壤质量变化提供参考,鼓励更多的农户改变施肥结构,实现土壤质量改善,推动粮食安全。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究区域位于四川省成都市郫都区安德镇安龙村,地处北纬30°51′、东经103°47′,气候为亚热带湿润季风性气候,具有气候温和、雨量充沛、降水集中、日照偏少、无霜期长和四季分明的特点。年平均气温15.8℃,无霜期280 d,年均降雨量为970 mm,年平均日照时数1308 h。安龙村紧邻的走马河为岷江都江堰灌区支流,该区域土种母质为岷江冲积物,土壤质

地为黏壤土。

1.2 试验设计

从2005年12月开始,在成都城市河流研究会(NGO)的引导下,安龙村部分村民陆续选择完全不用农药化肥的方式进行种植模式转化。相较于“传统农业”,本研究中这种农业被称为“生态农业”。完全按照生态种植方式生产3年(转化期),即被确认为生态农田。试验分别选择3户生态农户(EA1、EA2、EA3)和3户常规农户(TA1、TA2、TA3)的农田土壤进行研究。试验地在同一个村庄中,其母质类型相同,所差别的是近年来耕作方式的不同。两者最大的差别在于生态农业完全不用化肥,采用堆肥、沼液、油枯等有机肥作为肥料来源,常规农业主要依赖化肥,少量使用油枯和人粪尿。其中,堆肥为农业废弃物与马粪或猪粪混合,采用露天料堆方法,好氧发酵半年成熟后的堆肥产品。沼液由家养猪的排泄物在沼气池发酵形成。油枯为油菜籽榨油后的残渣制成的有机肥。为尽可能减少牲畜粪便带来的重金属污染,生态农户尽量使用家养鸡鸭粪便,部分使用重金属污染风险较低的养殖场猪粪和马粪进行堆肥。两种种植方式的概况及肥料使用情况见表1。

试验采用多点混合采样法,随机采集5个点位0~20 cm耕层土样,每块采样调查的耕地土壤面积为667 m²,采样时间为2016年5月。

1.3 分析指标与方法

分析指标包括重金属镉、铅、汞、砷、铬全量和有效态含量,pH、有机质、阳离子交换量、总氮、总磷、总钾、碱解氮、有效磷、有效钾、细菌、放线菌、真菌及生物量,共23项指标。分析方法见表2。

1.4 数据统计分析

采用Excel 2007和SPSS 17.0对试验数据进行单侧显著性检验和相关性分析。

显著性检验的方法:首先对生态农户EA1的3块农田取平均值,用平均值结果代替EA1的测量值;然后以不同种植类型分组进行单侧显著性检验。其中,对于pH、有机质、CEC、土壤养分和微生物指标,检验生态农业是否显著高于传统农业;对于重金属指标,检验生态农业是否显著低于传统农业。

2 结果与分析

2.1 不同种植模式下土壤菌群含量

不同种植模式对土壤菌群数量有明显的影响(表3)。生态种植的土壤中微生物碳含量及真菌、放线菌

表1 生态农田与常规农田种植概况
Table 1 Comparison of ecological and conventional farmland

类型 Types	农户 Farmers	生态种植年限 Years for EA	肥料 Fertilizers	作物 Crops
生态种植	EA1(1)	8	沼液、家养鸡鸭粪便、堆肥、油枯	包菜、玉米、豇豆、黄瓜、秋葵、油菜、牛皮菜、莲花白
	EA1(2)	10	沼液、家养鸡鸭粪便、堆肥、油枯	玉米、地瓜、空心菜
	EA1(3)	3	沼液、家养鸡鸭粪便、堆肥、油枯	茄子、韭菜、玉米、白菜、辣椒、莴笋、大头菜
	EA2	11	堆肥、沼液、油枯	茄子、豇豆、西红柿、黄瓜
	EA3	10	猪粪、牛粪、沼液、堆肥	南瓜、毛瓜、莴笋、旱黄瓜、扁豆
常规种植	TA1		碳铵、复合肥、磷肥	芸豆、豇豆、辣椒
	TA2		复合肥、油枯、人粪尿	茄子、莴笋、豇豆、玉米、南瓜、豌豆
	TA3		复合肥、碳酸氢铵、尿素	包菜、空心菜、玉米、黄豆、豇豆、韭菜

注:EA代表生态农业;TA代表传统农业;不同数字代表不同农户。下同。
Notes:EA is ecological agriculture;TA is traditional agriculture;the different numbers indicate different farmers. The same below.

表2 分析方法
Table 2 Analysis method

指标 Indicators	方法 Methods
总镉	HCl-HNO ₃ -HF-HClO ₄ 消煮,石墨炉原子吸收分光光度法
总铬	HCl-HNO ₃ -HF-HClO ₄ 消煮,火焰原子吸收分光光度法
总汞	原子荧光法
总铅	HCl-HNO ₃ -HF-HClO ₄ 消煮,石墨炉原子吸收分光光度法
总砷	原子荧光法
有效镉	0.1 mol·L ⁻¹ HCl浸提
有效铬	0.1 mol·L ⁻¹ HCl浸提
有效汞	0.1 mol·L ⁻¹ HCl浸提
有效铅	0.1 mol·L ⁻¹ HCl浸提
有效砷	0.1 mol·L ⁻¹ HCl浸提
pH	电位法(土:水=1:2.5)
有机质	重铬酸钾容量法,外加热法
CEC	乙酸铵交换法
细菌	平板稀释法
放线菌	平板稀释法
真菌	平板稀释法
生物量	氯仿熏蒸-硫酸钾浸提-硫酸亚铁滴定法
全氮	水杨酸修正凯氏法
全磷	HClO ₄ -H ₂ SO ₄ 法,钼锑抗比色法
全钾	氢氟酸消解法
有效氮	碱解扩散法
有效磷	盐酸-氟化铵提取,钼锑抗比色法(Bray法)
有效钾	中性醋酸铵浸提,火焰光度计法

数量均高于常规种植的土壤,分别高出常规土壤的20.8%、18.1%和68.1%。但生态种植的土壤中的细菌数量低于常规种植的土壤,为后者的58.5%。同时可以发现,生态种植及常规种植土壤中微生物碳含量

及真菌、放线菌数量标准差均较大。前者标准差偏大的原因是生态种植业者的肥料来源、用量、种植年限有很大的不同,改变土壤环境的程度也不同。显著性分析结果显示,不同种植模式对土壤菌群数量影响的显著性存在一定差异,其中放线菌的影响最显著,但整体而言 P 值都大于0.05,不具有统计意义上的显著性。

2.2 不同种植模式下土壤重金属含量

生态种植土壤中重金属铬、铅、汞和砷含量均低于常规种植(表4),分别相差6.02、1.10、0.03 mg·kg⁻¹和0.08 mg·kg⁻¹。常规种植的土壤中的镉含量与生态种植的土壤相当,两者平均相差0.04 mg·kg⁻¹,可视为采样和测定误差。有效镉的含量相差为0.13 mg·kg⁻¹。由于投入的肥料形式不同,镉的来源可能不同。生态种植的标准差较大,显著性分析结果显示,生态农业中有效铬和有效砷含量显著低于传统农业($P<0.05$)。

2.3 不同种植模式下土壤养分含量

生态耕作的土壤pH为5.91,而常规耕作的土壤pH为5.13,两者相差0.78个单位(表5)。生态种植土

表3 生态农业和传统农业土壤菌群数量对比
Table 3 Comparison of the amount of microbial community between ecological and traditional agriculture

指标 Indicators	生态农业 EA	传统农业 TA	P 值 P Value
微生物碳/mg·kg ⁻¹	179.5±73.1	148.6±62.3	0.53
细菌/10 ⁷ CFU·g ⁻¹	6.2±4.4	10.6±7.7	0.72
真菌/10 ⁴ CFU·g ⁻¹	1.63±10.6	1.38±7.9	0.60
放线菌/10 ⁶ CFU·g ⁻¹	7.9±3.8	4.7±4.5	0.13

壤中的有机质含量和CEC均高于常规种植土壤,分别高出后者35%和24%,但前者误差较大。生态种植土壤中总氮、总磷的含量均高于常规种植土壤(表5),分别高出31%和13%。这是因为有机种植通常会施入大量的有机肥。生态种植的土壤中的总钾含量略低于常规种植土壤,为后者的90%。生态种植的土壤中有有效氮、有效钾含量均高于常规种植土壤,分别高出后者的18%和33.6%,但前者误差较大。生态种植的土壤中有有效磷含量低于常规种植土壤,为后者的59.7%。显著性分析结果显示,不同种植模式对土壤pH、有机质、CEC和养分含量影响的显著性存在一定差异,其中pH、有机质、CEC相对比较显著,而养分含量中除总钾和有效磷外,其他均相对显著。但整体而言 P 值都大于0.05,不具有统计意义上的显著性。

表4 生态农业和传统农业土壤重金属含量对比

Table 4 Comparison of the contents of heavy metal between ecological and traditional agriculture

指标 Indicators	生态农业 EA	传统农业 TA	P 值 P Value
总镉/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.33±0.17	0.29±0.05	0.82
总铬/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	94.04±11.25	100.06±13.94	0.24
总铅/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	29.53±2.94	30.63±2.73	0.20
总汞/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.13±40.55	0.16±53.52	0.15
总砷/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	8.44±1.31	8.52±0.92	0.27
有效镉/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.16±0.16	0.03±0.02	0.92
有效铬/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.72±11.25	1.92±0.12	0.01
有效铅/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	4.83±1.56	5.47±0.66	0.19
有效汞/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.65±0.36	0.73±0.21	0.20
有效砷/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.17±0.16	0.38±0.04	0.03

表5 生态农业和传统农业土壤养分对比

Table 5 Comparison of the contents of soil nutrient between ecological and traditional agriculture

指标 Indicators	生态农业 EA	传统农业 TA	P 值 P Value
pH	5.91±0.86	5.13±0.64	0.07
有机质/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	39.44±18.85	29.30±3.37	0.17
CEC/ $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$	11.78±3.83	9.50±1.25	0.17
总氮/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	2.25±0.92	1.72±0.22	0.18
总磷/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	1.57±0.67	1.38±0.16	0.22
总钾/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	22.51±2.47	24.92±0.44	0.88
有效氮/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	219.10±72.93	186.20±9.26	0.21
有效磷/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	68.10±45.81	113.90±30.69	0.83
有效钾/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	288.20±400.64	215.67±33.65	0.31

2.4 土壤pH、有机质与土壤微生物、重金属和养分的相关分析

土壤pH、有机质含量与土壤微生物数量、重金属含量和养分含量之间的相关性见表6~表8。从表6可以看出,土壤pH与土壤放线菌数量呈显著正相关关系,与微生物碳含量及真菌和细菌数量无明显的相关性;土壤有机质含量与微生物数量之间均无明显的相关性。

从表7可以看出,土壤pH与重金属有效态含量呈较好的相关性,而与重金属全量无明显的相关性。有机质含量也呈现类似的关系。其中,土壤pH与有效铬、有效铅、有效汞和有效砷含量呈显著负相关,与有效镉含量呈极显著正相关。土壤有机质含量与有效铅呈极显著负相关,与有效汞呈显著负相关,与土壤总镉含量呈显著正相关。

从表8可以看出,土壤pH与土壤养分含量无明显相关关系,而土壤有机质含量与土壤CEC和土壤养分都存在良好的相关关系。其中,土壤有机质含量与土壤CEC、总氮、总磷、有效氮和有效钾均呈极显著正相关。

3 讨论

3.1 种植模式对土壤菌群数量的影响

土壤微生物是农田生态系统中的关键成员,在土壤有机质分解、养分转化和循环中具有重要作用。由于土壤微生物对土壤环境因子的变化极为敏感,土壤微生物被认为是评价自然或人为干扰引起土壤质量变化的重要指标。研究结果显示,生态农田的微生物碳比常规农田高出20.8%。这是因为:(1)施用有机肥促进作物根系生长,增加了根系分泌物释放,从而使微生物碳含量增加。研究对比了生态农田和常规农田四季豆根系(图1),发现生态农田更有利于作物

表6 土壤pH、有机质含量与土壤微生物数量之间的相关性(r)Table 6 Correlation between soil pH, organic matter content and soil microbial amount(r)

项目 Items	微生物碳 Microbial biomass carbon	放线菌 Actinomycetes	真菌 Fungus	细菌 Bacteria
pH	-0.703	0.841*	-0.751	0.055
有机质	-0.265	0.337	-0.522	0.372

注:*表示在 $P<0.05$ 水平(双侧)显著相关。下同。

Notes: * indicate significant differences (bilateral) at $P<0.05$ level. The same below.

表7 土壤pH、有机质含量与土壤重金属含量之间的相关性(*r*)
Table 7 Correlation between soil pH,organic matter and heavy metal contents(*r*)

项目 Items	总镉 Total Cd	总铬 Total Cr	总铅 Total Pb	总汞 Total Hg	总砷 Total As	有效镉 Available Cd	有效铬 Available Cr	有效铅 Available Pb	有效汞 Available Hg	有效砷 Available As
pH	0.772	-0.270	-0.615	-0.679	-0.807	0.928**	-0.831*	-0.833*	-0.839*	-0.866*
有机质	0.830*	-0.699	-0.586	-0.166	-0.259	0.790	-0.647	-0.943**	-0.828*	-0.692

注:**表示*P*<0.01水平(双侧)显著相关。下同。
Notes:** indicate significant differences(bilateral) at *P*<0.01 level. The same below.

表8 土壤pH、有机质含量与土壤养分含量之间的相关性(*r*)
Table 8 Correlation between soil pH,organic matter content and soil nutrient contents(*r*)

项目 Items	阳离子交换量 CEC	总氮 TN	总磷 TP	总钾 TK	有效氮 Available N	有效磷 Available P	有效钾 Available K
pH	0.774	0.712	0.792	-0.176	0.705	-0.119	0.578
有机质	0.985**	0.997**	0.969**	-0.520	0.982**	0.402	0.951**

根系生长;(2)生态农田土壤真菌和放线菌含量均高于常规农田,表明生态农田土壤微生物活动增强,使得其微生物碳含量增加。

研究结果显示,生态农田土壤的真菌和放线菌数量分别高出常规土壤18.1%和68.1%。其中,生态农田土壤放线菌数量增加明显,能增加土壤抗病虫害的抗生物质产生,提升土壤质量。出现这一结果的主要原因是:施用有机肥改善了土壤物理性状,为微生物的生长繁殖提供了良好的条件。生态农田土壤pH为5.91,常规农田土壤pH为5.13,生态农田土壤pH增加0.78个单位。表明施用有机肥可改善土壤酸化作用,

提高土壤pH,有利于微生物活动。土壤pH与土壤放线菌含量呈显著正相关证实了这一观点。此外,生态农田土壤团粒结构良好,存在较多蚯蚓,为微生物生长提供了更好的生长环境,而常规种植土壤中没有发现蚯蚓(图2)。

已有研究证明,与施用化肥相比施用有机肥可增加土壤中微生物碳,有机肥和化肥配合施用对微生物碳含量增加效果最好^[12],而且随有机肥用量的增加,土壤微生物碳也随之提高^[13-14],与本研究结果一致。

3.2 种植模式对土壤重金属含量的影响

重金属在土壤中不能被微生物分解,累积在土壤



Figure 1 Comparison of the roots of green beans between ecological and traditional agriculture



图2 生态农业与传统农业土壤对比

Figure 2 Comparison of soils between ecological and traditional agriculture

中,也可被植物吸收、富集,并通过食物链进入人体。研究显示,生态种植土壤中重金属铬、铅、汞和砷含量均低于常规种植,显著性分析结果显示,生态农业中有效铬和有效砷含量显著低于传统农业。这是由于土壤重金属含量与土壤pH值有关,pH值降低,重金属溶解度增加,土壤重金属含量增加。生态农田能在一定程度上缓解土壤酸化,增加土壤pH,使重金属有效态含量降低。土壤pH与有效铬和有效砷含量呈显著负相关证明了这一解释。

此外,相关性分析结果显示土壤有机质含量与有效铅和有效汞分别呈极显著和显著负相关关系,而与土壤镉含量呈显著正相关关系,即土壤有机质含量增加,土壤有效铅和有效汞含量降低,土壤镉含量增加。据检测,生态农田土壤中有机质含量比常规农田高35%,但其土壤重金属全量和有效态含量均低于常规农田。这与大多数研究者认为有机肥会增加农田重金属污染风险的观点不同。一般认为,由于目前大量畜禽粪便类有机肥来源于养殖场,而养殖场普遍使用含有Zn、Cu、Cr、As等重金属元素的饲料添加剂,增加了土壤重金属污染风险^[10,15]。本研究出现相反结论的原因是,生态农户没有使用养殖场畜禽粪便,而采用家庭养殖的鸡鸭粪便、油枯和蔬菜废弃物堆肥作为替代肥料,规避了养殖粪便带来的重金属污染风险。

3.3 种植模式对土壤养分含量的影响

我国农田土壤酸化现象严重^[16-17],而土壤酸化会对农业生产和生态环境造成严重危害。Guo等^[18]研究发现,我国主要农田土壤pH值在20年间平均下降了约0.5个单位,相当于土壤酸量(H^+)在原有基础上增加了2.2倍。本研究结果显示,生态农田土壤比常规耕作土壤的pH提高了0.78个单位,表明安龙村生态农业可维持土壤酸碱平衡,减缓土壤酸化。这是由于传统农业施用铵态氮肥,其在土壤中发生硝化反应并产生氢离子从而导致土壤酸化。而生态农田施用有机肥增加了土壤有机质含量(增加量为 $10.14\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),从而提高土壤的酸缓冲容量,提高土壤的抗酸化能力。此外,相关性分析显示,土壤pH与土壤养分含量无明显相关关系。

据表5显示,生态农田有机质含量比常规农田高 $10.14\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤CEC比常规农田高 $2.28\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。这是由于生态农田施用有机肥,增加了土壤中有机质含量,同时导致CEC含量增加。相关性分析表明,土壤有机质含量与CEC、总氮、总磷、有效氮和有效钾均呈极显著正相关关系,说明土壤有机质增加可以提高

土壤养分含量。这与前人研究结果一致,研究发现长期施用有机肥对提高土壤全效和有效养分等有良好的作用^[13,19-20]。林葆等^[21]对全国化肥试验网1981年以来在全国22个省(市、自治区)70个长期肥料试验结果的分析发现,长期施用有机肥土壤全量和有效养分明显提高,土壤理化性质得到改善。然而,本研究发现生态种植土壤中总钾和有效磷的含量低于常规种植。这是由于常规种植业者施用的复合肥钾含量较高,而从有机肥带入的钾含量较少。因此生态种植业者需施入适当的钾肥,以免钾成为制约生产的因素。土壤中的磷分为有机磷和无机磷,生态种植中有效磷低是由于施用有机肥后土壤中的磷主要存在于有机质中,导致有效磷较低,生态种植业者可适当施入骨粉等含磷高的物质补充无机磷的不足。

4 结论

(1)生态耕作的土壤pH、有机质、CEC、总氮、总磷、有效氮及有效钾含量均高于常规农田,表明生态种植可有效缓解土壤酸化,提高土壤有机质、CEC含量,同时能在一定程度上增加土壤养分含量。

(2)相比于常规农业,除细菌数量外,生态种植的土壤中微生物碳含量及真菌、放线菌数量较高,显示生态种植改善了土壤中微生物群落结构。

(3)生态种植土壤中重金属Cr、Pb、Hg和As含量均低于常规种植,Cd含量相差不大,表明生态农户使用油枯、农业废弃物堆肥等有机肥作为替代肥料可以有效减少带入的重金属。

致谢:

成都市河流研究会(河研会)为本研究提供了经费支持,特此感谢。感谢河研会全体员工在成都郫县安龙村设计并实施生态家园项目,为研究提供实验素材。同时,感谢河研会工作人员在本研究开展过程中给予的帮助。

参考文献:

- [1] Foley J A, Ramankutty N, Brauman K A, et al. Solutions for a cultivated planet[J]. *Nature*, 2011, 478(7369):337-342.
- [2] Ye X J, Wang Z Q, Li Q S. The ecological agriculture movement in modern China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, 92(2/3):261-281.
- [3] Wells A T, Chan K Y, Cornish P S. Comparison of conventional and alternative vegetable farming systems on the properties of a yellow earth in New South Wales[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2000, 80(1):47-60.
- [4] Edmeades D C. The long-term effects of manures and fertilisers on soil

- productivity and quality: A review[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2003, 66(2):165-180.
- [5] Aref S, Wander M M. Long-term trends of corn yield and soil organic matter in different crop sequences and soil fertility treatments on the morrow plots[J]. *Advances in Agronomy*, 1998, 62:153-197.
- [6] Arnold P W, Hunter F, Gonzalezfernandez P. Long-term grassland experiments at Cockle Park[J]. *Annales Agronomiques*, 1976, 27(5/6):1027-1042.
- [7] Blake L, Mercik S, Koerschens M, et al. Phosphorus content in soil, uptake by plants and balance in three European long-term field experiments[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 56(3):263-275.
- [8] Clark M S, Horwath W R, Shennan C, et al. Changes in soil chemical properties resulting from organic and low-input farming practices[J]. *Agronomy Journal*, 1998, 90(5):662-671.
- [9] Dick R P. A review: Long-term effects of agricultural systems on soil biochemical and microbial parameters[J]. *Agriculture ecosystems & Environment*, 1992, 40(1/2/3/4):25-36.
- [10] 王起超, 麻壮伟. 某些市售化肥的重金属含量水平及环境风险[J]. 生态与农村环境学报, 2004, 20(2):62-64.
WANG Qi-chao, MA Zhuang-wei. Heavy metals in chemical fertilizer and environmental risks[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2004, 20(2):62-64
- [11] 陈林华, 倪吾钟, 李雪莲, 等. 常用肥料重金属含量的调查分析[J]. 浙江理工大学学报, 2009, 26(2):223-227.
CHEN Lin-hua, NI Wu-zhong, LI Xue-lian, et al. Investigation and analysis of the content of heavy metals in common fertilizer[J]. *Journal of Zhejiang Sci-Tech University*, 2009, 26(2):223-227.
- [12] 宇万太, 赵鑫, 姜子绍, 等. 不同施肥制度对潮棕壤微生物量碳的影响[J]. 生态学杂志, 2007, 26(10):1574-1578.
YU Wan-tai, ZHAO Xin, JIANG Zi-shao, et al. Effects of different fertilization system on microbial biomass carbon in aquic brown soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(10):1574-1578.
- [13] 胡诚, 曹志平, 罗艳蕊, 等. 长期施用生物有机肥对土壤肥力及微生物生物量碳的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(3):48-51.
HU Cheng, CAO Zhi-ping, LUO Yan-rui, et al. Effect of long-term application of microorganismic compost or vermicompost on soil fertility and microbial biomass carbon[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(3):48-51.
- [14] 杨劲峰, 韩晓日, 阴红彬, 等. 不同施肥条件对玉米生长季耕层土壤微生物量碳的影响[J]. 中国农学通报, 2006, 22(1):173-175.
YANG Jin-feng, HAN Xiao-ri, YIN Hong-bin, et al. Effect of different fertilization treatment on the soil microbial biomass carbon of maize[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(1):173-175.
- [15] 曹铁华, 梁烜赫, 高洪军, 等. 不同施肥模式下土壤-玉米中重金属累积规律及安全性分析[J]. 吉林农业科学, 2015, 40(5):37-41.
CAO Tie-hua, LIANG Xuan-he, GAO Hong-jun, et al. Accumulation and risk analysis of heavy metals in soil-maize cropping system under different fertilization[J]. *Journal of Jilin Agricultural Sciences*, 2015, 40(5):37-41.
- [16] 张永春, 汪吉东, 沈明星, 等. 长期不同施肥对太湖地区典型土壤酸化的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(3):465-472.
ZHANG Yong-chun, WANG Ji-dong, SHEN Ming-xing, et al. Effects of long-term fertilization on soil acidification in Taihu Lake region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(3):465-472.
- [17] 刘付程, 史学正, 于东升. 近20年来太湖流域典型地区土壤酸度的时空变异特征[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(6):740-744.
LIU Fu-cheng, SHI Xue-zheng, YU Dong-sheng. Spatial and temporal variability of soil acidity in typical areas of Taihu Lake region in the last 20 years[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2006, 15(6):740-744.
- [18] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968):1008-1010.
- [19] 张伟, 陈洪松, 苏以荣, 等. 不同作物和施肥方式对新垦石灰土土壤肥力的影响[J]. 土壤通报, 2013, 44(4):925-930.
ZHANG Wei, CHEN Hong-song, SU Yi-rong, et al. Effects of reclamation and fertilization on calcareous soil fertility in the initial period of cultivation[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(4):925-930.
- [20] 王立刚, 李维炯, 邱建军, 等. 生物有机肥对作物生长、土壤肥力及产量的效应研究[J]. 中国土壤与肥料, 2004(5):12-16.
WANG Li-gang, LI Wei-jiong, QIU Jian-jun, et al. Effect of biological organic fertilizer on crops growth, soil fertility and yield[J]. *Soil and Fertilizer Sciences*, 2004(5):12-16.
- [21] 林葆, 林继雄. 长期施肥的作物产量和土壤肥力变化[J]. 植物营养与肥料学报, 1994, 1(1):6-18.
LIN Bao, LIN Ji-xiong. The changes of crop yield and soil fertility with long-term fertilizer application[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1994, 1(1):6-18.