

不同培肥模式下闽东茶园水土及其氮磷流失特征

王利民, 林新坚, 黄东风, 李卫华, 范平

(福建省农业科学院 土壤肥料研究所, 福建 福州 350013)

摘要: [目的] 研究不同培肥模式对闽东茶园水土及其氮磷流失的影响, 为该区茶园水土流失评价及防控提供科学依据。[方法] 通过径流小区试验, 设置 6 个处理: 全量化肥(NPK), 半量化肥+半量有机肥(1/2 NPKOM), 全量有机肥(OM), 全量化肥+豆科绿肥(NPKL), 半量化肥+半量有机肥+豆科绿肥(1/2NPKOM+L)和不施肥(CK)。[结果] 不同培肥处理下径流流失量的大小顺序为: OM>1/2 NPKOM>CK>NPKL>1/2NPKOM+L>NPK, 泥沙流失量表现为: OM>1/2 NPKOM>NPKL>CK>NPK>1/2NPKOM+L; OM 处理中径流携带的全氮、可溶性氮、硝态氮、铵态氮、全磷、可溶性磷等氮磷组分的流失量均较高, 而 1/2 NPKOM+L 中这些氮磷组分流失量则相对较低, 且泥沙结合态的全氮、全磷流失量在各处理中也有类似的变化规律。[结论] 1/2NPKOM+L 处理在减控茶园水土及其氮磷流失方面具有良好的保土保肥效果。

关键词: 培肥模式; 茶园; 水土流失; 氮磷流失

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)04-0069-04

中图分类号: S157.3

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.04.015

Effect of Different Fertilization Patterns on Losses of Soil, Water and Nitrogen, Phosphorus from Tea Garden in Eastern Fujian Province

WANG Limin, LIN Xinjian, HUANG Dongfeng, LI Weihua, FAN Ping

(Institute of Soil and Fertilizer, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou, Fujian 350013, China)

Abstract: [Objective] The effect of fertilization patterns on losses of soil, water and nitrogen, phosphorus from tea garden in eastern Fujian Province was studied in order to provide a scientific basis for evaluation and prevention and control of soil and water loss in this region. [Methods] The experiment contained six treatments: no fertilization(CK), chemical fertilizers(NPK), half-organic manure plus half-chemical fertilizers(1/2 NPKOM), organic manure(OM), legume stover returned plus chemical fertilizers(NPKL), half-organic manure plus legume stover returned plus half-chemical fertilizers(1/2 NPKOM+L). [Results] Among all the treatments, water losses were ranked as OM>1/2 NPKOM>NPKL>CK>NPK>1/2 NPKOM+L, and soil losses followed the orders of OM>1/2 NPKOM>NPKL>CK>NPK>1/2 NPKOM+L. Furthermore, the OM treatment had maximum concentrations of soil nutrients including total N (TN), dissolved N (DN), NO₃-N, NH₄⁺-N, total P(TP) and dissolved P(DP) losses in runoff, while the 1/2 NPKOM+L treatment had minimum concentrations of those nitrogen and phosphorus fractions compared to other fertilizer treatments. Similarly, the contents of TN, TP in sediment were the highest in OM treatment, but the lowest in 1/2 NPKOM+L treatment. [Conclusion] The 1/2 NPKOM+L treatment could be considered as a better choice of fertilization practice with respect to reducing soil, water, and nitrogen, phosphorus nutrient losses from tea soils in the region.

Keywords: fertilization pattern; tea garden; soil and water loss; nitrogen and phosphorus loss

福安市地处福建省东北部,位于闽东的中心。该
市气候温和,雨量充沛,非常适宜茶树生长,是生产绿

茶和花茶的主产区,素有“中国茶叶之乡”的美誉。茶
区主要集中分布于丘陵、山地,以山坡梯层茶园为

收稿日期:2014-06-20

修回日期:2014-07-02

资助项目:国家科技支撑计划项目“主要类型农牧废弃物制肥质量控制及产业化循环利用集成示范”(2012BAD14B15-6);福建省农业科学院
博士科研启动基金项目(2010BS-7);福建省自然科学基金项目(2011J05057);福建省农业科学院青年人才创新项目(2014CX-5)

第一作者:王利民(1979—),男(汉族),江西省鹰潭市人,博士,主要从事土壤改良利用研究。E-mail:gb898@126.com。

通信作者:林新坚(1956—),男(汉族),福建省永泰县人,学士,研究员,主要从事土壤微生物技术与土壤培肥研究。E-mail:xinjianlin@163.com。

主^[1]。茶园土壤母质多为花岗岩,具有深厚的风化壳,结构松散,抗侵蚀能力弱,在缺乏植被而又没有水土保持措施的情况下极易发生水土流失。现有茶园水土流失面积达 $9.1 \times 10^3 \text{ hm}^2$, 占该市茶园面积的 60%, 侵蚀模数为 $11.2 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ^[2]。此外,水土流失过程中伴随着氮、磷养分的大量流失,不仅造成周边环境的水体富营养化,而且通过土壤淋滤作用,导致地下水硝酸盐等物质含量超标,降低了农产品质量,对人体的健康构成威胁^[3]。同时,人为的不合理施肥,会进一步加剧水土及其氮磷养分的流失,并导致茶园土壤生产力下降^[4-5]。因此,在红黄壤区如何实施科学培肥,减少水土及其氮磷养分流失一直是科学研究的热点^[6-8]。已有的研究结果^[3,9-12]表明,土地利用、植被类型、降雨特性以及地形的差异均会造成水土及其氮磷流失的变化。但是,这些相关研究多数集中在黄土高原和紫色土地区,而对红黄壤区茶园的研究鲜见报道。鉴于此,本研究围绕该区茶园水土流失问题,分析不同培肥模式下茶园水土及其携带的氮、磷组分流失特征,探讨各培肥措施与水土及其氮磷流失的关系,为闽东茶园水土流失评价及防控提供科学依据。

1 研究区概况

定位试验径流小区设在福建省福安市郊。该市位于福建省东北沿海($119^\circ 23' - 119^\circ 51' \text{ E}$, $26^\circ 41' - 27^\circ 24' \text{ N}$),属于中亚热带海洋性季风气候。地貌以中、低山,丘陵为主,适宜茶树生长。地带性土壤为红、黄壤。试验始于 2006 年,测得试验地土壤的平均基础肥力水平为 pH 值 5.19,有机质质量分数 7.40 g/kg,全氮含量为 0.40 g/kg,全磷为 0.10 g/kg,全钾为 22.40 g/kg,碱解氮 58.34 mg/kg,有效磷含量为 0.87 mg/kg,速效钾为 77.20 mg/kg。年均温 $19.3 \text{ }^\circ\text{C}$,年日照时数 1 836.6 h,年降水量 1 539.9 mm,3—9 月为雨季,降水量占年总降水量的 81.5%,10 月份至翌年 2 月份为旱季。

2 材料与方法

2.1 试验设计

试验设在福建隽永天香茶业有限公司茶叶基地,采用随机区组试验设计,共 6 个处理,分别为 CK(不施肥);NPK:全量化肥;1/2 NPKOM:半量化肥+半量有机肥;OM:全量有机肥;NPKL:全量化肥+豆科绿肥[圆叶决明(*Cassia rotundifolia* Pers., 34721 品系)];1/2 NPKOM+L:半量化肥+半量有机肥+豆科绿肥。每处理重复 3 次,共 18 个小区,每个小区面

积为 $4.55 \text{ m} \times 3.00 \text{ m}$ 。另外,每小区各设两个大小相同的径流池和分流池($1.50 \text{ m} \times 1.50 \text{ m} \times 1.50 \text{ m}$)。池壁用砖和水泥建成,池底用混泥土浇筑;池壁为双砖结构,用水泥粉砌砖墙的内、外壁,以免出现渗漏;池顶端铺设水泥板,防止雨水及杂物入池。为防止小区之间、小区和周边地块之间的串水现象,使用隔离埂隔开。隔离埂为单砖浆砌的墙体,水平防渗性强,墙体高 50 cm,其中地下部分 40 cm,地上部分 10 cm。此外,圆叶决明播种量为 $7.5 \text{ kg}/\text{hm}^2$,每年冬季自然枯萎于茶园行间表土,其成熟的种子也随之散落,在次年春天自然萌发。有机肥中有机质质量分数 368.9 g/kg,全 N 9.0 g/kg,全 P (P_2O_5) 22.90 g/kg,全 K 5.29 g/kg。化肥分别用尿素、磷酸一铵和氯化钾。

供试茶树为黄观音(*Camellia sinensis*),2006 年 5 月定植。由于茶树树龄较小,养分需求量较少,2006 年 10 月 19 日和 2007 年 4 月 3 日两次施肥水平较低,即 N $51.45 \text{ kg}/\text{hm}^2$, P_2O_5 $16.95 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 和 K_2O $16.95 \text{ kg}/\text{hm}^2$;此后按照正常水平施肥,施肥量详见表 1。

表 1 各处理小区的施肥量 kg/hm^2

处理	尿素	磷酸一铵	氯化钾	有机肥
CK	—	—	—	—
NPK	208.95	67.80	56.51	—
1/2 NPKOM	104.48	33.90	28.25	5 716.50
OM	—	—	—	11 433.00
NPKL	208.95	67.80	56.51	—
1/2 NPKOM+L	104.48	33.90	28.25	5 716.50

注:CK 为不施肥;NPK 为施全量化肥;1/2 NPKOM 为施半量化肥+半量有机肥;OM 为施全量有机肥;NPKL 为施全量化肥+豆科绿肥;1/2 NPKOM+L 为施半量化肥+半量有机肥+豆科绿肥。下同。

2.2 样品采集与测定

在 2012 年雨季的 5—9 月,收集前期均有持续较大降雨量的 5 次产流及 3 次产沙样品,并记载各径流池水面高度,计算径流量。采集径流水样时,首先用清洁工具充分搅匀池中水体,并立即用清洁容器在径流池内多点采集水样 500 ml,最后将径流池清洗干净,以备下次径流取样时用。同时,水样须及时运回实验室,经烘干、称重后用滤纸过滤。滤液用于测定总氮(TN)、可溶性氮(DN)、硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)、铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、总磷(TP)和可溶性磷(DP)的质量分数。滤纸及泥沙经干燥、称重后,干土用信封保存,同一个小区不同时期的泥沙样品置于同一信封内,以备测定泥沙中 TN,TP 质量分数。

泥沙 TN 测定采用凯氏定氮法, TP 采用酸溶—钼锑抗比色法^[13]。径流水样氮、磷的测定方法参照《水和废水监测分析方法》^[14]。其中,水样 TN 和 DN 采用碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度计比色法测定, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 使用靛酚蓝比色法测试, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 运用紫外分光光度法分析;水样 TP 和 DP 均采用过硫酸钾氧化—钼蓝比色法测定。

数据采用 SAS 8.02 软件进行 ANOVA 方差分析和 Duncan's 新复极差法多重比较。

3 结果与分析

3.1 不同培肥模式下闽东茶园水土流失特征

3.1.1 不同培肥模式下茶园地表径流流失特征 不同培肥模式下茶园地表径流流失特征如图 1 所示。由图 1 可得,径流流失的大小顺序为: $\text{OM} > 1/2 \text{NPKOM} > \text{CK} > \text{NPKL} > 1/2 \text{NPKOM} + \text{L} > \text{NPK}$ 。表明套种圆叶决明的 NPKL 和 $1/2 \text{NPKOM} + \text{L}$ 两种培肥模式的径流流失量较小,因为套种圆叶决明,其地上部分的枝叶能减少雨滴溅蚀以及拦截部分降水,加之地下部分根系的穿插作用,使土壤具有良好的孔隙结构,从而增加水分入渗,减少了地表径流^[15]。NPK 处理的径流流失量最小,这一定程度上是受土壤质地的影响所致。因为单施化肥 NPK 处理的土壤中粗砂粒和中砂粒含量均处于较高水平,而粉粒和黏粒含量则都较低,导致土壤蓄水保肥性能差^[13,16],从而增强了土壤水分入渗,减少了地表径流的流失。

3.1.2 不同培肥模式下茶园地表径流中泥沙流失特征 由图 1 可知,不同培肥模式下泥沙流失量变化趋势与径流流失特征相似,流失量有大到小表现为: $\text{OM} > 1/2 \text{NPKOM} > \text{NPKL} > \text{CK} > \text{NPK} > 1/2 \text{NPKOM} + \text{L}$ 。单施有机肥 OM 处理虽可提升土壤的肥力水平^[16],但同时土壤流失量也较大。因此,施用有机肥的同时,需结合圆叶决明套种,进行综合培肥处理,才能有效控制土壤流失。

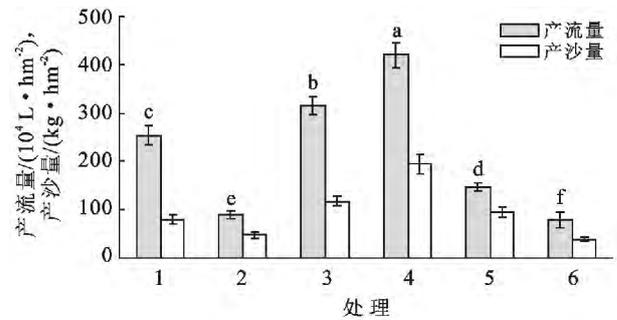


图 1 研究区不同培肥模式下茶园地表产流产沙特征

注:不同小写字母表示各处理间存在显著差异($p < 5\%$)。下同;处理 1 为 CK, 2 为 NPK, 3 为 $1/2 \text{NPKOM}$, 4 为 OM, 5 为 NPKL, 6 为 $1/2 \text{NPKOM} + \text{L}$ 。

3.2 不同培肥模式下闽东茶园氮磷流失特征

3.2.1 不同培肥模式下茶园径流中氮、磷组分流失特征 茶园径流氮、磷组分流失状况详见表 2。由表 2 可以看出,OM 处理径流携带的 TN, DN, $\text{NO}_3^- - \text{N}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, TP, DP 等氮磷组分的流失量均较高,而 $1/2 \text{NPKOM} + \text{L}$ 中这些氮磷组分流失量则较低。因为套种圆叶决明,其根系能疏松土壤,促进水分下渗,有利于 DN 随水渗透到更深层的土壤,从而降低了地表径流对 DN 的转运能力^[17-18];此外,滞留在圆叶决明根区的部分土壤氮素还可以被根吸收,将其同化为自身的组织,这也减缓了氮素的流失^[19-20];而磷在茶园土壤内的截留机理与氮不同,由于磷元素没有发生化合价的变化,磷的截留转化主要是通过套种的圆叶决明根系作用,增加土壤中磷素的渗透和吸收实现的,这有助于减轻径流携带磷素而产生流失^[21-22]。另外,在不同培肥处理下,茶园土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的流失量明显高于 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,因为茶树吸收是茶园截留转化氮素的重要机理,它改变了氮素的存在位置,从土壤和地下水中吸收氮素养分,转运到茶树体内形成有机氮,又通过凋落、死亡等输送到地表,经过矿化分解产生大量无机氮,为反硝化作用创造有利条件,可以去除部分 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,这是茶园 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 流失量较少的一个重要原因^[23]。

表 2 不同培肥模式下茶园地表径流氮、磷组分流失特征

处理	TN/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	DN/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	$\text{NO}_3^- - \text{N}/$ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	$\text{NH}_4^+ - \text{N}/$ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	TP/ ($\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$)	DP/ ($\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$)
CK	1.529 ± 0.024^c	0.872 ± 0.024^c	0.084 ± 0.007^c	0.223 ± 0.054^c	26.577 ± 1.046^c	25.059 ± 1.157^c
NPK	0.541 ± 0.013^e	0.309 ± 0.012^e	0.030 ± 0.005^e	0.079 ± 0.042^e	9.415 ± 0.287^e	8.878 ± 1.325^e
$1/2 \text{NPKOM}$	1.904 ± 0.088^b	1.086 ± 0.032^b	0.105 ± 0.007^b	0.278 ± 0.013^b	33.100 ± 0.968^b	31.208 ± 3.256^b
OM	2.539 ± 0.052^a	1.448 ± 0.025^a	0.141 ± 0.012^a	0.371 ± 0.029^a	44.130 ± 2.292^a	41.609 ± 4.141^a
NPKL	0.887 ± 0.016^d	0.505 ± 0.018^d	0.049 ± 0.006^d	0.130 ± 0.008^d	15.416 ± 1.191^d	14.536 ± 2.084^d
$1/2 \text{NPKOM} + \text{L}$	0.478 ± 0.035^f	0.273 ± 0.013^f	0.026 ± 0.004^f	0.070 ± 0.007^f	8.298 ± 0.228^f	7.824 ± 0.645^f

注:表中数据为平均值±标准差;不同小写字母表示各处理间存在显著差异($p < 5\%$)。下同。

3.2.2 不同培肥模式下茶园泥沙中氮、磷养分流失特征 茶园小区泥沙中携带的氮、磷流失特征详见表 3。由表 3 可以看出,OM 处理的土壤 TN,TP 流失量均较高,而 1/2 NPKOM+L 处理则较低。因此,虽然施用有机肥可以促进与氮、磷循环元素有关酶的活性,从而增加土壤有效氮、磷的含量^[24-25],但是在茶园

施用有机肥的同时,应套种圆叶决明,才能达到培肥保肥的作用。此外,处理 CK,NPK,1/2 NPKOM,OM,NPKL 及 1/2 NPKOM+L 的径流携带的 TN 质量分数分别是泥沙的 2.78,1.12,2.99,3.02,4.52 和 3.01 倍,而 TP 则分别是泥沙的 0.80,1.32,0.72,0.26,0.56,1.35 倍。

表 3 不同培肥模式下茶园地表泥沙氮、磷流失特征

指标	CK	NPK	1/2 NPKOM	OM	NPKL	1/2 NPKOM+L
TN/(kg·hm ⁻²)	0.280±0.016 ^e	0.124±0.011 ^e	0.315±0.029 ^b	0.841±0.093 ^a	0.194±0.008 ^d	0.109±0.016 ^f
TP/(g·hm ⁻²)	61.198±2.561 ^d	37.582±4.627 ^e	69.142±8.034 ^c	190.665±11.224 ^a	87.664±10.006 ^b	36.711±5.114 ^f

4 结论

(1) 不同培肥模式对茶园地表径流流失量影响存在明显差异。单施有机肥的 OM 处理径流流失量大,但配施化肥、并套种圆叶决明后,可以减控地表径流的损失。

(2) 不同培肥处理对茶园表土泥沙侵蚀量影响存在显著差异。1/2 NPKOM+L 处理的土壤流失量较小,能有效降低茶园土壤的流失,而 OM 处理下茶园产沙量相对较大。

(3) 处理 1/2 NPKOM+L 可显著降低径流和泥沙中携带的氮磷组分质量分数。此外,不同的培肥方式,其氮、磷组分的流失载体及形态也不同;其中,氮素的损失主要是通过径流且主要以 NH₄⁺-N 的形式流失;而磷素在处理 CK,1/2 NPKOM,OM 和 NPKL 中主要通过泥沙为载体流失,在 NPK 及 1/2 NPKOM+L 措施中主要以径流的形式损失。

[参 考 文 献]

[1] 王峰,吴志丹,陈玉真,等. 提高福建茶园土壤肥力质量的技术途径[J]. 福建农业学报,2012,27(10):1139-1145.

[2] 龚伟,颜晓元,蔡祖聪,等. 长期施肥对华北小麦—玉米轮作土壤物理性质和抗蚀性影响研究[J]. 土壤学报,2009,46(3):520-525.

[3] 郭甜,何丙辉,姚军,等. 紫色土坡耕地施肥水平对土壤侵蚀及氮磷流失影响[J]. 水土保持学报,2012,26(4):59-63.

[4] 徐华勤,肖润林,杨知建,等. 不同培肥措施对红壤茶园土壤微生物量碳的影响[J]. 生态学杂志,2007,26(7):1009-1013.

[5] 姚槐应. 不同利用年限茶园土壤的化学及微生物生态特征研究[J]. 浙江农业科学,2002(3):129-131.

[6] 山仑. 水土保持与可持续发展[J]. 中国科学院院刊,2012,27(3):116-120.

[7] Liang Yin, Li Decheng, Lu Xixi, et al. Soil erosion

changes over the past five decades in the red soil region of Southern China[J]. Journal of Mountain Science, 2010,7(1):92-99.

[8] Cogle A L, Rao K P C, Yule D F, et al. Soil management for Alfisols in the semiarid tropics: erosion, enrichment ratios and runoff[J]. Soil Use and Management, 2002,18(1):10-17.

[9] 章文波,付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J]. 资源科学,2003,25(1):35-41.

[10] 张晓明,余新晓,武思宏,等. 黄土丘陵沟壑区典型流域土地利用/土地覆被变化对径流产沙的影响[J]. 北京林业大学学报,2007,29(6):115-122.

[11] Dahlke C, Bork H R. Soil Erosion and Soil Organic Carbon Storage on the Chinese Loess Plateau[M]. New York: Springer, 2012:83-98.

[12] 曾立雄,黄志霖,肖文发,等. 三峡库区不同土地利用类型氮磷流失特征及其对环境因子的响应[J]. 环境科学,2012,33(10):3390-3396.

[13] 中华人民共和国林业部科技司. 林业标准汇编[M]. 北京:中国林业出版社,1991:96-293.

[14] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京:中国环境科学出版社,2002:3-8.

[15] 王晓南,孟广涛,姜培曦,等. 浅谈植物措施在水土保持中的作用机理[J]. 水土保持应用技术,2008(4):25-27.

[16] 王利民,林新坚,黄东风,等. 红壤茶园不同培肥模式的土壤理化效应[J]. 东北林业大学学报,2012,40(1):54-57.

[17] Mankin K R, Ngandu D M, Barden C J, et al. Grass-shrub riparian buffer removal of sediment, phosphorus, and nitrogen from simulated runoff1[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2007,43(5):1108-1116.

[18] Schoonover J E, Williard K W J, Zaczek J J, et al. Nutrient attenuation in agricultural surface runoff by riparian buffer zones in southern Illinois, USA[J]. Agroforestry Systems, 2005,64(2):169-180.

(下转第 78 页)

土壤过氧化氢酶活性、土壤蔗糖酶活性和土壤脲酶活性均高于矿山生态型小飞蓬单种,而矿山生态型马唐单种和矿山生态型龙葵单种的土壤过氧化氢酶活性、土壤蔗糖酶活性和土壤脲酶活性均高于各自的农田生态型单种。

[参 考 文 献]

- [1] 李广云,曹永富,赵书民,等.土壤重金属危害及修复措施[J].山东林业科技,2011,41(6):96-101.
- [2] 刘春阳,张宇峰,滕洁.土壤中重金属污染的研究进展[J].污染防治技术,2006,19(4):42-45.
- [3] 钟晓兰,周生路,黄明丽,等.土壤重金属的形态分布特征及其影响因素[J].生态环境学报,2009,18(4):1266-1273.
- [4] 杨志新,冯圣东,刘树庆.镉、锌、铅单元素及其复合污染与土壤过氧化氢酶活性关系的研究[J].中国生态农业学报,2005,13(4):138-141.
- [5] 杨苏才,南忠仁,曾静静.土壤重金属污染现状与治理途径研究进展[J].安徽农业科学,2006,34(3):549-552.
- [6] 邱莉萍,张兴昌. Cu, Zn, Cd 和 EDTA 对土壤酶活性影响的研究[J].农业环境科学学报,2006,25(1):30-33.
- [7] 刘敬武,单爱琴,揣小明,等.重金属离子 Cd²⁺, Pb²⁺ 污染对土壤酶活性的影响[J].污染防治技术,2008,21(1):19-22.
- [8] 陈玲玲.土壤酶活性对土壤重金属污染的指示研究[D].陕西西安:西安科技大学,2012.
- [9] Ahmad I, Cheng Z, Meng H, et al. Effect of pepper-garlic intercropping system on soil microbial and biochemical properties [J]. Pakistan Journal of Botany, 2013, 45(2):695-702.
- [10] 张劲松.汉源县水果流通业发展研究[D].四川雅安:四川农业大学,2008.
- [11] Li Jintian, Qiu Jianwen, Wang Xiaowei, et al. Cadmium contamination in orchard soils and fruit trees and its potential health risk in Guangzhou, China [J]. Environment Pollution, 2006, 143(1):159-165.
- [12] 张凯.镉富集植物小飞蓬对镉的耐性机制研究[D].福建福州:福建农林大学,2010.
- [13] 魏树和,周启星,王新,等.一种新发现的镉超积累植物龙葵 (*Solanum nigrum* L.) [J]. 科学通报, 2004, 49(24):2568-2573.
- [14] Ewais E A. Effects of cadmium, nickel and lead on growth, chlorophyll content and proteins of weeds [J]. Biologia Plantarum, 1997, 39(3):403-410.
- [15] 鲍士旦.土壤农化分析[M]. 3 版.北京:中国农业出版社,2000.
- [16] 程籍,廖明安,林立金,等.不同生态型小飞蓬对酸樱桃镉积累及土壤酶活性的影响[J].华北农学报,2013,28(6):153-158.
- [17] 周礼恺.土壤酶学[M].北京:科学出版社,1987.
- [18] 高秀丽,邢维芹,冉永亮,等.重金属积累对土壤酶活性的影响[J].生态毒理学报,2012,7(3):331-336.
- [19] 耿广东,王忠平,冯道友,等.玉米与姜间作对土壤微生物和酶活性的影响[J].土壤通报,2009,40(5):1104-1106.

(上接第 72 页)

- [19] Lowrance R, Altier L S, Williams R G, et al. REMM: The riparian ecosystem management model [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 55(1):27-34.
- [20] Peterjohn W T, Correll D L. Nutrient dynamics in an agricultural watershed; Observations on the role of a riparian forest [J]. Ecology, 1984, 65(5):1466-1475.
- [21] Vymazal J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands [J]. Science of the Total Environment, 2007, 380(1/3):48-65.
- [22] Prior H, Johnes P J. Regulation of surface water quality in a Cretaceous Chalk catchment, UK: An assessment of the relative importance of instream and wetland processes [J]. Science of the Total Environment, 2002, 282(2):159-174.
- [23] Wen Yue, Chen Yi, Zheng Nan, et al. Effects of plant biomass on nitrate removal and transformation of carbon sources in subsurface-flow constructed wetlands [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(19):7286-7292.
- [24] 王利民,李卫华,范平,等.长期培肥下红黄壤区茶园土壤酶活性的变化[J].茶叶科学,2012,32(4):347-352.
- [25] Roldán A, Salinas-García J R, Alguacil M M, et al. Soil enzyme activities suggest advantages of conservation tillage practices in sorghum cultivation under subtropical conditions [J]. Geoderma, 2005, 129(3/4):178-185.