

N, Mn 元素添加及其二者交互作用对金沙江干热河谷 典型植物凋落物土壤酶活性影响

樊博¹, 闫帮国^{1,2,3}, 方海东¹, 史亮涛¹, 何光熊¹,
潘志贤¹, 岳学文¹, 范建成¹, 李建查¹

(1. 云南省农业科学院 热区生态农业研究所, 云南 元谋 651300;

2. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:通过野外模拟试验, 研究 N, Mn 元素添加及二者交互作用对干热河谷典型植物(小花扁担木 *Grewia biloba*、攀枝花 *Bombax malabaricum*、橡皮树 *Ficus elastica*、车桑子 *Dodonaea viscosa*、象草 *Ennisetum purpureum*) 五种植物叶片凋落物土壤酶活性的试验。结果发现: 象草在四种处理方式下植物凋落物土壤磷酸酶、土壤过氧化物酶、土壤脲酶活性整体均高于其他植物。小花扁担木在 N 处理下高于其他植物同处理下调落物土壤葡萄糖苷酶活性, 其酶活性为 124.89 mmol/g, 是 CK 的 5.17 倍。车桑子在 N, Mn 同时添加下调落物土壤多酚氧化酶活性高于其他处理, 且攀枝花、象草的土壤多酚氧化酶活性变化较为一致, 均表现为 NM>N>Mn。同时, N, Mn 元素添加及其二者同时添加对植物凋落物酶活性产生很大的影响, 尤其是氮添加影响较大; 物种与过氧化物酶之间呈极显著性差异 ($p < 0.001$), 元素添加只对土壤葡萄糖苷酶影响很大。土壤酸性磷酸酶与土壤葡萄糖苷酶、多酚氧化酶之间存在极显著相关性, 相关系数达到了 0.75, 0.39; 土壤葡萄糖苷酶与土壤多酚氧化酶之间存在极显著相关性。本研究结果可为金沙江干热河谷地区的开展小流域治理水土流失提供理论指导和技术支撑。

关键词:生态系统; 干热河谷; 土壤酶活性; 相关性分析

中图分类号: S154.2; Q948.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)01-0220-05

Effect of N, Mn Elements and Their Interaction on the Soil Enzyme Activities of the Typical Plant Litter in the Jinsha River Hot valley

FAN Bo¹, YAN Bangguo^{1,2,3}, FANG Haidong¹, SHI Liangtao¹,
HE Guangxiong¹, PAN Zhixian¹, YUE Xuewen¹, FAN Jiancheng¹, LI Jiancha¹

(1. Institute of Tropical Eco-agricultural Sciences, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Yuanmou, Yunnan 651300, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Chengdu 610041, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The field simulation experiment was conducted to examine the effect of N, Mn elements and their interaction on the soil enzyme activities of the typical plant litter (*Grewia biloba*, *Bombax malabaricum*, *Ficus elastic*, *Dodonaea viscosa*, *Ennisetum purpureum*) in the hot valley. The results showed that under four treatments the plant litter soil phosphatase, soil peroxidase and urease activity of *Ennisetum purpureum* were higher than those of other plants. *Grewia biloba* under N treatment the activity of grape glycosides was higher than that of other plants, the enzyme activity was 124.89 mmol/g, was 5.17 times that of CK. *Dodonaea viscosa* under N, Mn while adding the soil litter polyphenol oxidase activity was higher than other treatments, and the changes of the activity of soil polyphenol oxidase in *Bombax malabaricum* and *Ennisetum purpureum* were more consistent, was expressed as NM>N>Mn. At the same time, the addition of N, Mn

收稿日期: 2016-02-20

修回日期: 2017-03-27

资助项目: 国家自然科学基金(31460127); 中国科学院西部之光西部博士项目的资助; 云南省应用基础研究计划青年基金项目(2017FD024)

第一作者: 樊博(1987—), 男, 河南太康人, 研究实习员, 硕士, 主要从事生态恢复及菌根生态学方面研究。E-mail: 599185482@qq.com

通信作者: 闫帮国(1979—), 男, 安徽合肥人, 博士, 研究方向: 主要从事化学计量学及生态恢复方面研究。E-mail: 805816050@qq.com

and two of them had the great effect on the plant litter enzyme activity, especially the effect of nitrogen addition, and the significant difference between species and peroxidase ($p < 0.001$) was found. Element addition only had a great effect on the soil glucosidase. There was significant correlation between soil acid phosphatase and soil glucosidase, polyphenol oxidase, correlation coefficients reached to 0.75 and 0.39, respectively; there was significant correlation between soil glucosidase and soil polyphenol oxidase. The results of this study can provide theoretical guidance and technical support for the control of water loss and soil erosion in small watershed of hot valley area of the Jinsha River.

Keywords: ecological system; dry-hot valley; soil enzyme activity; correlation analysis

金沙江干热河谷是我国云贵高原地区生态环境较为脆弱地区,由于存在着独特的地理环境造成该地区水热矛盾较为突出,植被覆盖度低,降雨量少,水土流失严重,植被恢复工作成为该地区研究的热点问题。因干热河谷植被的凋落物养分的释放深刻地影响着土壤理化性质、土壤微生物数量及土壤酶活性,同时土壤酶活性又能够在一定程度上反映土壤中进行的各种生物化学过程的强度和方向,所以土壤酶活性可以作为评价土壤肥力状况的重要指标,是反映土壤品质的生物学活性指标^[1]。

国外研究中不仅将土壤酶活性作为评价土壤健康和质量的重要指标^[2],酶活性也被认为是植被恢复过程中土壤修复的指示剂^[3]。Vestgarden^[4]研究发现外加氮源对针叶林凋落物的分解有促进作用;也有研究发现,添加氮对凋落物的分解有抑制作用或影响不明显^[5-6];赵玉涛研究者^[7]研究了不同氮水平下两种林型的主要土壤酶活性,氮沉降增加对土壤酶活性的作用与林分类型有关,短期施氮可以显著影响土壤酶的活性;高氮沉降降低了土壤多酚氧化酶活性,且随着多酚氧化酶活性的降低,两种林型土壤纤维素酶和蔗糖酶活性也有降低的趋势。王光华等^[8]研究氮肥对大豆根圈土壤酶活性的影响,结果发现不同氮肥对大豆根圈土壤酶活性及氮营养状况影响很大。郭天财研究者^[9]研究在大田冬小麦同生育时期内,随着施氮水平的提高,土壤蛋白酶、过氧化氢酶及脱氢酶活性均呈先增后降的变化趋势,以 180 kg N/hm² 施氮水平的活性最高;脲酶活性则随氮水平的提高而上升,在 360 kg N/hm² 施氮水平下达到最高。锰在植物代谢过程中的作用是多方面的,如直接参与光合作用,促进氮素代谢,调解植物体内氧化还原状况等,这些作用往往是通过锰对酶活性的影响来实现的^[10]。锰主要是 36 种酶的活化剂,3 种酶的成分^[11]。锰还参与一系列酶促反应,主要包括脱羧基作用、水解反应、磷酸化作用等,锰也影响吡啶乙酸的代谢,是吡啶乙酸合成作用的辅因子^[12-14]。但已有研究主要侧重

于长期施肥及不同耕作方式下的土壤酶活性变化^[15-16],对于氮、锰元添加对其干热河谷的植被凋落物酶活性影响研究较少。氮肥、锰肥作为常用的肥料,盲目施用肥料会导致土壤结构恶化、肥力下降,破坏了生态系统^[17]。为此本研究通过野外模拟试验,添加 N, Mn 元素研究干热河谷典型植物凋落物的土壤酶活性变化,探讨出不同植物凋落物土壤酶活性对 N, Mn 元素添加及二者交互作用的响应,揭示干热河谷植物凋落物土壤酶活性变化,旨在为干热河谷的水土保持工作及生态恢复方面治理提供理论依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区域位于金沙江干热河谷元谋县云南省农业科学院热区生态农业研究所试验基地。金沙江干热河谷是我国西南地区最为干旱的地区之一,水热矛盾较为突出,平均年蒸发量约为平均年降雨量的 6 倍,存在明显的干湿季之分,年均温大于 20℃,干季可达 6 个月,漫长少雨,多年平均降雨量 613.8 mm,其降水量仅为全年的 10.0%~22.2%^[18]。土壤类型主要为变性土、燥红土、紫色土以及薄层土^[19]。

1.2 试验设计

试验选择在金沙江干热河谷元谋试验基地开展试验,所有的试验样方均位于山坡上。共选择了 15 个 2 m × 2 m 样地,每个样地之间有足够的隔离带,以避免小区之间水分和养分的横向运输。2013 年、2014 年在金沙江干热河谷区域野外采集 5 种典型干热河谷植物的叶片凋落物作为试验材料,包括攀枝花 (*Bombax malabaricum*)、橡皮树 (*Ficus elastic*)、车桑子 (*Dodonaea viscosa*)、小花扁担木 (*Grewia biloba*)、象草 (*Ennissetum purpureum*) 的凋落物各 200 g,并将这些采回的凋落物装入尼龙网袋(孔径为 1.0 mm × 1.0 mm,大小为 15 cm × 10 cm)中,每个试验样方中放入各个物种的凋落袋 1 袋。2014 年 6 月 16 日将凋落袋放入样方中,并在 2014 年 6 月 19 日、

2014 年 8 月 10 日以及 2015 年 6 月 10 日对试验小区进行元素添加,本试验共设计 4 处理,即对照组(CK)、N 添加($0.9 \text{ mol/m}^2 \text{ NH}_4\text{NO}_3$)、Mn 添加($0.009 \text{ mol/m}^2 \text{ MnSO}_4$)和 N,Mn(NM)同时添加,各处理的小区在空间上随机排列,每种处理 3 个重复。

1.3 样品采集、测定项目及分析

2015 年 6 月 20 日,取出试验小区中的尼龙网袋,带回实验室处理样品,将尼龙网袋外部的杂草、植物根系、无脊椎动物、杂草等小心的剥去,将尼龙网袋剪开取出凋落物及土壤作为测试样品,并保存在 4°C 的冰箱中保存。测定凋落物土壤中的酸性磷酸酶(AP)、葡萄糖苷酶(BG)、多酚氧化酶(POP)、过氧化物酶(PER)、脲酶(U)等指标,所有酶活性均表示为单位有机质(g)下的底物分解速率,具体测定方法参照^[20]。

1.4 数据处理与分析

数据处理采用 Excel 2003, SPSS 20.0 统计软件完成。其中,元素添加对凋落物质量损失率采用 SPSS 20.0 进行方差分析,用最小显著差异法(LSD)多重比较变量间的差异显著性;用 SPSS 20.0 分析凋落物酶活性的相关性。数据的变异性用标准差(SD)表示。

2 结果与分析

2.1 N, Mn 元素添加及其二者交互作用对干热河谷植物凋落物土壤酶活性影响

土壤酶以稳定的蛋白质形式存在与土壤中,参与了包括土壤生物化学过程在内的自然界物质循环^[21]。土壤酶在土壤生态系统的物质循环和能量转化中起着非常重要的作用,它催化土壤中的一切生物化学反应,其活性大小是土壤肥力的重要标志^[22]。从图 1 可以看出,不同植物的凋落物土壤酶活性是存在差异性。DV 在不同处理方式下 5 种的土壤酶活性均差异性显著。其中:(1) AP:PP 在四种处理方式下植物凋落物土壤磷酸酶活性整体高于其他植物。其中,BM,GB 在 N 处理下的土壤酸性磷酸酶活性较高,分别为 26.86 mmol/g OM , 61.34 mmol/g OM , DV 在 CK 处理下与氮锰同时添加处理下的土壤磷酸酶活性存在显著性差异。(2) BG:GB 在 N 处理下高于同处理下其他植物凋落物土壤葡萄糖苷酶活性,其酶活性达到了 124.89 mmol/g OM ,是 CK 的 5.17 倍。DV 在 CK 处理与 N, NM 同时添加酶活性呈显著性差异;F 在 EN 与 NM, CK 下酶活性存在显著差异,其他处理无显著性差异。(3) POP:DV 在 N, Mn 同时添加下凋落物土壤酶活性高于其他处理。DV,

FE, GB 在 Mn 处理下的活性 $> \text{N}$ 处理, BM, PP 的酶活性表现一致,均为 $\text{NM} > \text{N} > \text{Mn}$ 处理的土壤多酚氧化酶活性。DVN 处理下与氮锰同时添加下存在显著性差异。(4) PER:PP 在 4 种处理下均高于其他植物的凋落物土壤酶活性, N 处理下:PP 的酶活性分别是 BM, DV, FE, GB 凋落物土壤酶活性的 18.33 倍、2.57 倍、2.84 倍、2.99 倍。Mn 处理下:PP 的酶活性分别是 BM, DV, FE, GB 凋落物土壤酶活性的 2.66 倍、2.93 倍、3.68 倍、1.47 倍;NM 处理下:PP 的酶活性分别是 BM, DV, FE, GB 凋落物土壤酶活性的 2.10 倍、1.24 倍、2.48 倍、1.66 倍。FE 的 CK 处理与 N 处理之间存在显著性差异。(5) U:PP 在各处理下均表现脲酶活性较高。其中, BM 在氮锰同时添加下含量较高,达到了 13.49 mg/g OM , DV 在 Mn 处理下酶活性响应明显,分别是是对照组、氮添加下酶活性的 1.48 倍、4.80 倍, GB 在氮锰同时添加下土壤酶活性较高,酶活性分别比 CK, N, Mn 处理下多 7.66 mg/g OM , 15.89 mg/g OM , 10.79 mg/g OM 。FE 在 CK 处理与 Mn 处理之间差异性显著, PP 的 CK 处理与 N 处理之间存在显著性差异。整体看来, PP 在四种处理方式下植物凋落物 AP, PER, U 活性整体高于其他植物。又从分析结果不难发现,每种植物对 N, Mn 和 NM 同时添加后的土壤酶活性变化是不一致的,影响着生态系统的物质循环和能量转化,其植被凋落下的土壤养分也会随之发生变化。

2.2 元素、物种对元谋干热河谷植物凋落物土壤酶活性的方差分析

从表 1 中可以看出,元素添加和物种对植物凋落物土壤酶活性产生了一定影响。其中,物种对土壤磷酸酶活性呈显著差异($p < 0.05$);物种与过氧化物酶之间呈极显著性差异, p 值达到了 0.001 水平。元素添加只对葡萄糖苷酶影响很大,它们之间呈显著性差异($p = 0.0438$)。元素和物种对土壤酶活性影响是多方面的,诸如土壤磷酸酶活性受到土壤基本理化性质、植被覆盖以及存在于土壤中能够激发或抑制酶活性的无机或者有机物等的影响^[23]。

2.3 N, Mn 元素添加及其二者交互作用对元谋干热河谷植物凋落物土壤酶活性相关性分析

从表 2 中可以看出,添加元素后土壤酶活性存在一定程度的相关性。土壤酸性磷酸酶与土壤葡萄糖苷酶、多酚氧化酶之间存在极显著相关性,相关系数达到了 0.75, 0.39;葡萄糖苷酶与多酚氧化酶之间存在极显著相关性,多酚氧化酶与过氧化物酶之间存在极显著相关性,其他土壤酶之间存在弱相关性。

表 1 元素、物种对元谋干热河谷植物土壤酶活性的方差分析

F 值	AP	BG	POP	PER	U
物种	3.0110*	1.5590	2.4340	5.600**	0.5350
元素	2.2140	2.9560*	0.8580	0.5010	2.2400
物种×元素	0.5960	0.7750	1.1410	0.5500	1.0830

注: AP: 酸性磷酸酶; BG: 葡萄糖苷酶; POP: 多酚氧化酶; PER: 过氧化物酶; U: 脲酶。* 代表在 5% 水平下显著差异, ** 代表在 1% 水平下极显著差异。下同。

表 2 元素添加对元谋干热河谷植物凋落物土壤酶活性相关性分析

相关系数	AP	BG	POP	PER	U
AP	1.000				
BG	0.750**	1.000			
POP	0.390**	0.360**	1.000		
PER	0.130	0.000	0.520**	1.000	
U	0.160	0.190	0.190	0.030	1.000

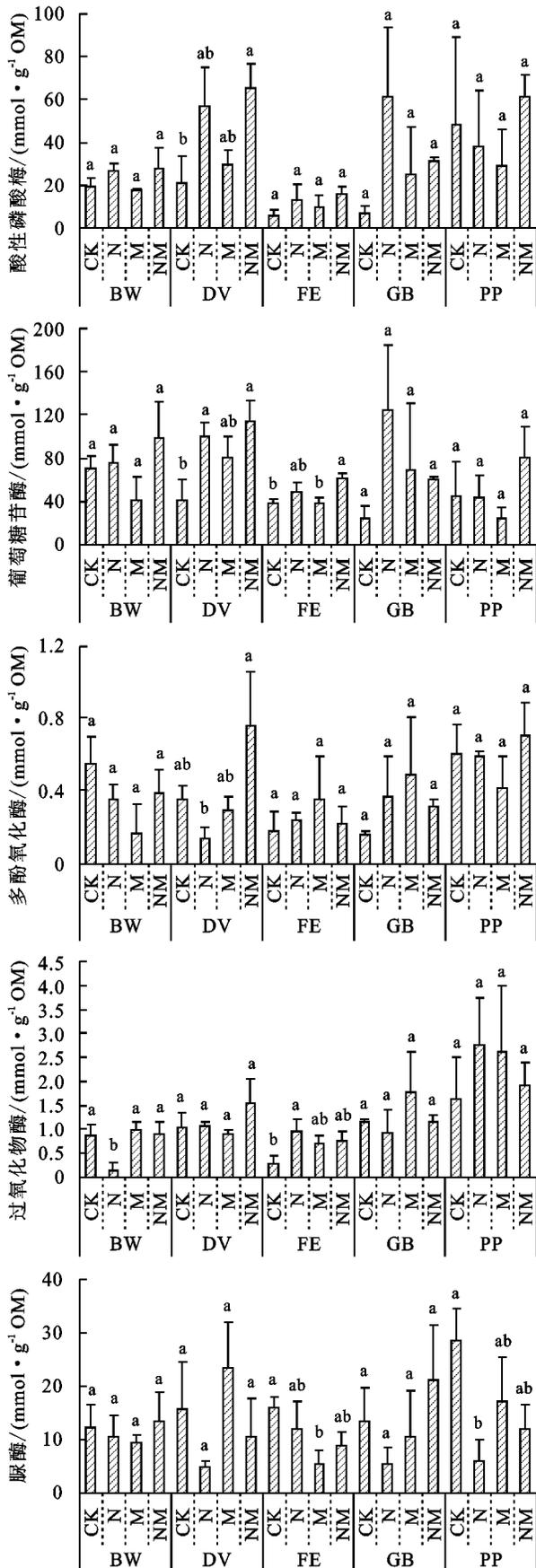
3 结论与讨论

在以往的研究中主要集中在土壤养分与土壤酶活性之间的关系研究方面^[24-26]。本研究以干热河谷植被凋落物入手, 探讨不同植被凋落物土壤酶活性, 探明了研究区域添加 N, Mn 元素后不同植物的凋落物土壤酶活性的差异性及相关性。

(1) 本研究发现 N 添加显著提高了干热河谷典型植被下土壤磷酸酶活性。其原因可能是土壤磷酸酶蛋白由 C, N 等基本元素构成, 添加 N 元素在一定程度上促进了磷酸酶合成^[27]; 或是由于添加了 N 元素后, 提高了土壤中的微生物对其他养分的需求(尤其是 P), 所以微生物通过分泌更多的磷酸酶来获取有效 P^[28]。

(2) N, Mn 元素添加及其二者同时添加对植物凋落物酶活性产生很大的影响。攀枝花和车桑子在 N 处理下凋落物土壤酸性磷酸酶、土壤葡萄糖苷酶活性高于对照。土壤酶活性对 N 元素较为敏感, 但受到土壤水气热条件、土壤理化性质、土壤微生物群落组成和生态系统结构的影响, 在不同的生态系统中土壤酶活性对氮元素的响应往往有所不同^[29,30], 就造成过氧化物酶、脲酶等土壤酶活性变化加氮后不显著。本研究中, Mn 处理下 5 种植物的土壤酶活性变化不大, 这可能是由于本研究的试验周期较短, 可能无法显示出其对植物凋落物土壤酶活性的影响, 这与 Aponte C. 研究者对 Mn 的研究结果相一致, Mn 对凋落物土壤酶活性的影响主要限于分解后期^[31], Mn 能促进种子和幼苗的早期生长, Mn 对试验前期影响不显著。

(3) 物种对植物凋落物土壤酶活性存在显著性差异, 主要是不同物种在凋落物分解中产生的化学组分不同。如, 小花扁担木的分解速率比其他几种植物的凋落物分解快, 木质素、矿质养分释放到土壤中的养分较多, 造成土壤微生物数量增多、土壤酶活性等



注: 以上数据均为平均值±标准误, 小写字母代表在 5% 显著水平。

BM: 攀枝花, DV: 车桑子, FE: 橡皮树, GB: 小花扁担木, PP: 象草。

图 1 元素添加对干热河谷植物凋落物土壤酶活性影响

增加,土壤酸性磷酸酶、多酚氧化酶差异性显著。同时,一些元素添加也会改变凋落物土壤酶活性,如 Mn 元素的添加可刺激与木质素降解有关的微生物活动^[32],有利于凋落物分解后期木质素的解体,从而加快了凋落物的分解影响了土壤酶活性。

(4) 添加元素后土壤酶活性存在一定程度的相关性。土壤过氧化氢酶、脲酶和磷酸酶都可加速土壤营养元素循环,所以酶活性的变化趋势与土壤营养元素具有一定相关性^[33-34]。土壤酶活性与土壤理化性质有密切联系,特别是 N 元素与土壤磷酸酶、过氧化氢酶的相关性较好;Mn 可以活化许多脱氢酶,对呼吸有重要的意义,Mn 能促进碳水化合物的水解,还可以激活羧化酶^[35],因此,可用凋落物土壤酶活性来反映干热河谷凋落物对土壤酶活性的影响,同时为干热河谷的生态恢复方面的研究提供理论指导。

参考文献:

- [1] Sharpley A N. The enrichment of soil phosphorus in run of sediments [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1983(9):521-526.
- [2] Bossio D A, Fleck J A, Scow K M, et al. Alteration of soil microbial communities and water quality in restored wetlands [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38 (6):1223-1233.
- [3] Garcia C, Hernandez T, Roldan A, et al. Organic amendment and mycorrhizal inoculation as a predict in afforestation of soils with *Pinus halepensis* Miller: Effect on their microbial activity [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 3(8):1173-1181.
- [4] Vestgarden L S. Carbon and nitrogen turnover in the early stage of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) needle litter decomposition: effects of internal and external nitrogen [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(4/5):465-474.
- [5] Micks P, Downs M, Magill A H, et al. Decomposing litter as a sink for 15 N-enriched additions to an oak forest and a red pine plantation [J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196(1):71-87.
- [6] Prescott C, Blevins L L, Staley C. Litter decomposition in British Columbia forests: Controlling factors and influences of forestry activities [J]. *Journal of Ecosystems and Management* 2004, 5(2):44-57.
- [7] 郭天财, 宋晓, 马冬云, 等. 施氮量对冬小麦根际土壤酶活性的影响 [J]. *应用生态学报*, 2008, 19(1): 110-114.
- [8] 王光华, 金剑, 潘相文, 等. 不同氮肥对大豆根圈土壤酶活性和氮营养分布的影响 [J]. *大豆科学*, 2003, 22(3):213-217.
- [9] 郭天财, 宋晓, 马冬云, 等. 施氮量对冬小麦根际土壤酶活性的影响 [J]. *应用生态学报*, 2008, 19(1):110-114.
- [10] 陆景陵. *植物营养学* [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2011.
- [11] Burnell J. The biochemistry of manganese in plants [M] // Graham R D, Hannam R J, Uren N C. *Manganese in Soils and Plants*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988:125-137.
- [12] 曾广文. *植物生理学* [M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1998, 40.
- [13] 史瑞和. *植物营养原理* [M]. 江苏: 江苏科学技术出版社, 1989.
- [14] 潘瑞炽. *植物生理学* [M]. 北京: 高等教育出版社, 1995.
- [15] 林天, 何园球, 李成亮, 等. 红壤旱地中土壤酶对长期施肥的响应 [J]. *土壤学报*, 2005, 42(4):682-686.
- [16] 高明, 周保同, 魏朝富, 等. 不同耕作方式对稻田土壤动物、微生物及酶活性的影响研究 [J]. *应用生态学报*, 2004, 15(7):1177-1181.
- [17] 张绍林, 朱兆良, 徐银华, 等. 关于太湖地区稻麦上氮肥的适宜用量 [J]. *土壤*, 1988, 20(1):5-9.
- [18] 方海东, 魏雅丽, 刘刚才, 等. 金沙江干热河谷银合欢人工林对土壤养分的影响 [J]. *干旱区研究*, 2011, 28(2):229-234.
- [19] 闫帮国, 纪中华, 何光熊, 等. 金沙江干热河谷植物叶片元素含量在地表凋落物周转中的作用 [J]. *生态学报*, 2013, 33(18):5668-5674.
- [20] Sinsabaugh R L, Klug M J, Collins H P, et al. Characterizing soil microbial communities [M] // Robertson P G, Coleman D C, Bledsoe C S, et al. *Standard Soil Methods for Long-term Ecological Research*. New York: Oxford University Press, 1999:318-348.
- [21] 关松荫. *土壤酶及其研究法* [M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [22] 曹慧, 杨洁, 孙波, 等. 太湖流域丘陵地区土壤养分的空间变异 [J]. *土壤*, 2002, 34(4):201-205.
- [23] 舒世燕, 王克林, 张伟, 等. 喀斯特峰丛洼地植被不同演替阶段土壤磷酸酶活性 [J]. *生态学杂志*, 2010, 29(9):1722-1728.
- [24] 罗勇. 贵州中部喀斯特山区退耕还林还草对土壤肥力的影响 [J]. *农技服务*, 2012, 29(5):567-569.
- [25] 李丹, 张勃, 戴声佩, 等. 民勤绿洲耕地荒地退耕还林地土壤肥力及物理特性比较研究 [J]. *土壤*, 2011, 43(3):398-405.
- [26] 张伟华, 李文忠, 张昊, 等. 青海大通退耕还林不同混交配置模式对土壤肥力影响的研究 [J]. *水土保持研究*, 2005, 12(5):263-266.
- [27] Marklein A R, Houlton B Z. Nitrogen inputs accelerate phosphorus cycling rates across a wide variety of terrestrial ecosystems [J]. *New Phytologist*, 2012, 193 (3):696-704.
- [28] Chung H, Zak D R, Reich P B, Ellsworth D S. Plant species richness, elevated CO₂, and atmospheric nitrogen deposition alter soil microbial community composition and function [J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(5):980-989.
- [29] Guo P, Wang C Y, Feng X G, et al. Mixed inorganic and organic nitrogen addition enhanced extracellular enzymatic activities in a subtropical forest soil in east China [J]. *Water, Air & Soil Pollution*, 2011, 216(1):229-237.

- OL]. (2010-02-06) [2013-11-29]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/tjgb/qtjgb/qgqjtjgb/201002/t20100211_30641.html.
- [2] 鲍全盛,王华东. 我国水环境非点源污染研究与展望[J]. 地理科学, 1996, 16(1): 66-71.
- [3] 李惠,苏保林. 平原河网地区农业非点源污染负荷估算方法综述[J]. 北京师范大学学报:自然科学版, 2009, 45(5/6): 662-666.
- [4] Young R A, Onstad C A, Bosch D D, et al. AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watershed[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1989, 44(2): 168-173.
- [5] Chung S W, Gassman P W, Kramer L A, et al. Validation of EPIC for two watersheds in southwest Iowa[J]. Journal of Environmental Quality, 1999, 28(3): 971-979.
- [6] Baginska B, Milne-Home W, Cornish P S. Modeling nutrient transport in Currency Creek, NSW with AnnAGNPS and PEST[J]. Environmental Modelling and Software, 2003, 18(8/9): 801-808.
- [7] 陈欣,郭新波. 采用 AGNPS 模型预测小流域磷素流失的分析[J]. 农业工程学报, 2000, 16(5): 44-47.
- [8] 刘亚琼,杨玉林,李法虎. 基于输出系数模型的北京地区农业面源污染负荷估算[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 7-12.
- [9] Johnes P J. Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: the export coefficient modeling approach[J]. Journal of Hydrology, 1996, 183(3/4): 323-349.
- [10] 李娜,韩维峥,沈梦楠,等. 基于输出系数模型的水库汇水区农业面源污染负荷估算[J]. 农业工程学报, 2016, 32(8): 224-230.
- [11] Worrall F, Burt T P. The impact of land-use change on water quality at the catchment scale: The use of export coefficient and structural models[J]. Journal of Hydrology, 1999, 221(1/2): 75-90.
- [12] Ierodiaconou D, Laurenson L, Leblanc M, et al. The consequences of land use change on nutrient exports: a regional scale assessment in south-west Victoria, Australia[J]. Journal of Environment Management, 2005, 74(4): 305-316.
- [13] Rast W, Lee G F. Nutrient Loading Estimates for Lakes[J]. Journal of Environmental Engineering, 1983, 109(2): 502-517.
- [14] 杜娟,李怀恩,李家科. 基于实测资料的输出系数分析与陕西洋河流域非点源负荷来源探讨[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(4): 827-837.
- [15] 杨彦兰,申丽娟,谢德体,等. 基于输出系数模型的三峡库区(重庆段)农业面源污染负荷估算[J]. 西南大学学报, 2015, 37(3): 1-9.
- [16] 鲍全盛,王华东. 我国水环境非点源污染研究与展望[J]. 地理科学, 1996, 16(1): 66-71.
- [17] 王全金,徐刘凯,向速林,等. 应用输出系数模型估算赣江下游非点源污染负荷[J]. 人民长江, 2011, 42(23): 31-33.
- [18] 李永文,马建华,王国清. 河南地理[M]. 河南开封: 河南大学出版社, 1999.
- [19] 张桂宾,王安周,耿秀丽. 河南省耕地变化及其人文驱动力研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(4): 65-68.
- [20] 张本昫,申怀飞,郑敬刚,等. 河南省土地利用景观格局分析[J]. 资源科学, 2009, 31(2): 317-323.
- [21] 李谢辉,王磊. 河南省土地利用/覆盖景观格局变化分析[J]. 水土保持研究, 2012, 19(5): 83-89.
- [22] 沈珍瑶,刘瑞民,叶闽,等. 长江上游非点源污染特征及其变化规律[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [23] 河南省统计局. 河南统计年鉴 2015[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
- [24] 吴毛琴,钟崇林. 农村环境污染问题的原因及对策[J]. 决策探索, 2007(8): 98-99.
- [25] 沈连峰,梁华新,赵秋义,等. 河南省淮河流域农业非点源污染现状及其控制措施[J]. 河南科学, 2007, 25(6): 1055-1058.

(上接第 224 页)

- [30] Lü Y N, Wang C Y, Wang F Y, et al. Effects of nitrogen addition on litter decomposition, soil microbial biomass, and enzyme activities between leguminous and non-leguminous forests[J]. Ecological Research, 2013, 28(5): 793-800.
- [31] Aponte C, García L, Marañón T. Tree Species Effect on Litter Decomposition and Nutrient Release in Mediterranean Oak Forests Changes Over Time[J]. Ecosystems, 2012, 15(7): 1204-1218.
- [32] Taylor B R, Parkinson O M, Parsons W F J. Nitrogen and lignin content as predictors of litter decay rates: A microcosm test[J]. Ecology, 1989, 70(1): 97-104.
- [33] 杨涛. 樟子松林下土壤养分、微生物及酶活性的研究[J]. 土壤通报, 2006, 37(2): 253-257.
- [34] 朱丽,郭继勋,鲁萍,等. 松嫩羊草草甸碱茅群落土壤酶活性比较研究[J]. 草业学报, 2002, 11(4): 28-34.
- [35] 陆景陵. 植物营养学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003.