

中国西南喀斯特地区土壤动物生态学研究进展

戴祥艳 唐 静 宋理洪*

(贵州大学农学院, 贵阳 550025)

摘 要 中国西南喀斯特地区生态环境十分脆弱,在人为活动和自然因素的严重干扰下,该区生态系统遭到严重的破坏。土壤动物是喀斯特地区生态系统能量流动和物质循环至关重要的生物驱动因子,在保护和改善土地资源、防控该地区生态退化中有着重要意义。该区土壤动物类群组成丰富,具有明显的表聚性;随石漠化程度的加重,土壤动物类群数有减少的趋势;生境越复杂、扰动越小,土壤动物群落结构也越复杂、个体密度和类群数越高;不同海拔的土壤动物群落结构存在异质性。当前,中国西南喀斯特地区土壤动物生态学研究存在分类水平不高、生态服务功能研究较少、对自然因素和人为因素响应的研究不够深入等问题。未来中国西南喀斯特地区土壤动物生态学研究应在生物指示作用、生态服务功能、微生态调控与作用机制及对当今热点环境问题的响应等方面展开深入研究。

关键词 喀斯特地区; 土壤动物; 石漠化; 土地利用; 海拔

A review on ecological studies of soil fauna in karst region, Southwest China. DAI Xiang-yan, TANG Jing, SONG Li-hong* (College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China).

Abstract: The ecological environment is vulnerable in the karst region, southwest China. Ecosystems have been seriously destroyed by the intense human activities and severe natural environment condition. Soil fauna have a pivotal role in energy flow and material cycling in ecosystems in karst region. They play an important role in protecting soil resources and controlling ecosystem degeneration in karst region. Soil fauna are rich in group numbers with an obvious accumulation in surface soil layer. The densities and group numbers of soil fauna are more abundant in complex and less disturbed habitats. Soil fauna community structure varies among habitats at different altitudes. Shortcomings in current researches included poor proficiency in species classification, less attention on fauna ecological functions and their response to changes of natural environmental factors and human activities. To better understand the role of soil fauna in the recovery and management in karst region of southwest China, future studies should focus on aspects of biological indicators, ecological function, regulation and mechanism in soil micro-ecological processes, and concerning their responses to current hot environmental issues.

Key words: karst region; soil fauna; rocky desertification; land use; altitude.

全球喀斯特地貌分布广泛,占地球陆地面积的15%(Larson, 2011)。东南亚、欧洲地中海地区、中美洲、北美东南部,以及中国西南地区均有广泛分布(He *et al.*, 2008; Zhao *et al.*, 2014)。中国西南喀斯

特地貌以贵州为中心分布,是中国乃至世界热带、亚热带喀斯特分布面积最大、发育最强烈的高原山区(王世杰等, 2003)。由于各种地质作用的制约和人为活动的干扰,喀斯特地区的土壤表现出贫瘠、岩溶干旱、低磷、高钙等特点(龙健等, 2005; 鲍乾等, 2017),植物的生长发育将受到严重影响。喀斯特地区具有复杂的人地关系和环境脆弱的特点、不合理的人为活动、环境的脆弱性和易伤性等,导致喀斯特地区的生态环境严重恶化(熊康宁等, 2002)。喀

国家自然科学基金(41807055 和 U1612442)、贵州省自然科学基金(黔科合 LH 字[2017]7287 号、黔科合平台人才(2017)5788 号、黔科合平台人才[2018]5781 号)和贵州省生物学一流学科建设项目(GNYL[2017]009)资助。

收稿日期: 2019-01-14 接受日期: 2019-06-01

* 通讯作者 E-mail: lihong_song@qq.com

斯特地区生态环境退化日益严重,已引起学者们的广泛关注。

土壤动物是指生命周期有一段时间在土壤中渡过,且对土壤有一定影响的动物(尹文英,2000)。其数量大、类群多、食性复杂、分布广,是陆地生态系统重要的组成部分(Sumner, 2000; Decaëns *et al.*, 2006)。土壤动物在土壤生态系统中起分解动植物残体、促进物质循环,改善土壤物理、化学和生物学性质,同时能反映生境的优越程度及人类活动的强度(Pankhurst *et al.*, 1995; Alexandra *et al.*, 1997; 蒋海东等,2006; 聂立凯等,2019)。此外,在病虫害的生物防控和污染物降解方面也起着重要作用(傅声雷,2018)。

近年来,国外学者对喀斯特地区土壤动物生态学的研究主要集中在不同气候条件下土壤动物群落组成、丰富度、多样性等特征(Kováč *et al.*, 2005; Raschmanová *et al.*, 2008, 2013, 2016),以及火烧等环境扰动对土壤动物群落影响的研究(Hosoishi *et al.*, 2015)。国内学者对喀斯特地区土壤动物生态学的研究主要集中在不同类群土壤动物的生态效应(兰洪波等,2011; Zhao *et al.*, 2015; Ning *et al.*, 2016; 杨大星等,2019),生态恢复的不同演替阶段土壤动物群落结构(唐政等,2018),以及不同土地利用方式对土壤动物的群落结构特征、多样性、功能类群的影响方面等(王仙攀等,2012a, 2012b; 史沉鱼等, 2016; 杨大星等,2016)。本文综述了近20年关于中国西南喀斯特地区土壤动物生态学的研究,以期为中国西南喀斯特地区土壤动物的生态学研究 and 喀斯特地区的生态系统恢复提供参考资料。

1 喀斯特地区土壤动物群落特征

1.1 土壤动物类群组成

土壤动物种类繁多,中国西南喀斯特地区土壤动物类群组成的研究也初见成效。虽然喀斯特地区是生态环境脆弱区,但其生态类型多样,生境多样性高,因而有较为丰富的土壤动物类群数量(宋理洪等,2018)。但在自然或人为干扰下,土壤动物群落结构表现出一定的差异。赵基等(2013)研究发现,自然状态下四种不同石漠化程度的样地中,共有的土壤动物优势类群仅有蜚蠊目和双翅目幼虫两种,共有的常见类群也仅有等翅目、线虫和鳞翅目幼虫等三种,而不同石漠化程度样地间土壤动物群落组成结构差异较大。在人为活动扰动的喀斯特桑园

中,土壤动物类群主要有直翅目和膜翅目(蚁科)(兰洪波等,2010)。宋理洪等(2018)通过整合分析,结果显示中国西南喀斯特地区土壤动物隶属于5门15纲31类,类群丰富;中小型土壤动物中螨类和跳虫为优势类群,常见类群有寡毛纲、腹足纲、螨类、蜘蛛目、等足目、倍足纲、蜚蠊目、等翅目、直翅目、鳞翅目、缨翅目、半翅目、双翅目、唇足纲等14类;大型土壤动物优势类群为膜翅目和鞘翅目,常见类群有线虫、寡毛纲、蜘蛛目、蝎纲、双尾纲、膜翅目、鞘翅目、双翅目、半翅目等9种。在人为干扰或自然因素的影响下,西南喀斯特地区土壤动物的优势类群有较强的环境适应能力,能改善土壤的结构与功能;稀有类群对环境的适应性相对较差,在土壤环境恶化时,这些稀有类群将难以生存和繁衍,易受到环境变化的影响(赵志成等,2011)。

1.2 土壤动物季节分布

中国西南喀斯特地区土壤动物个体密度和类群数在不同季节均存在差异。自然条件下,土壤动物个体密度和类群数在季节上呈现夏、秋、春、冬依次递减的变化趋势(兰洪波等,2010; 史沉鱼等, 2016),且在雨季土壤动物类群数和个体密度均大于旱季(张智英等,2005)。中国西南喀斯特地区位于亚热带地区,雨热同季,土壤温度和湿度变化基本一致,而夏季/雨季的土壤温度和湿度适合土壤动物繁殖(宋理洪等,2018)。但在中国喀斯特地区的桑园,土壤动物的类群数表现为春=夏=秋>冬,个体密度表现为春>夏>秋>冬,与研究区的人为活动有关(李晓东等,2016);在斯洛伐克喀斯特地区土壤动物类群数表现为春>秋,与该研究区的气候有关(Raschmanová *et al.*, 2015)。在非喀斯特地区的森林、草地、农田等生态系统,土壤动物类群数和个体密度通常秋季最高(尚艳芳,2010; 严莹等,2010; 许还,2018)。由于秋季土壤温度和湿度较为适合土壤动物的繁衍;且秋季凋落物增加了土壤动物的食物来源(庄海峰,2010)。

1.3 土壤动物垂直分布

中国西南喀斯特地区土壤动物的分布在土壤垂直剖面上呈现出明显聚集于土壤表层的分布规律,即表聚性现象(张智英等,2005; 赵志成等,2010; 杨大星等,2012),这与非喀斯特地区土壤动物的研究结果一致(战丽莉等,2012; 杨旭等,2016; 李红月等, 2017)。土壤动物的表聚性是因为土壤的枯枝落叶层和腐殖质层含有较高的有机质和其他营养成分,

生境适宜,更有利于土壤动物生存。但随着土层的加深,土壤养分和有机质含量降低,从而导致土壤动物的垂直分布由表层向底层逐渐减少(樊云龙等,2010)。

2 石漠化对土壤动物群落特征的影响

喀斯特地区的生态环境十分脆弱,植被退化严重,进而加速石漠化进程,不同等级的石漠化对喀斯特地区土壤动物个体密度、多样性及丰富度等均会产生一定的影响。喀斯特地区石漠化划分不同等级,即无明显石漠化、潜在石漠化、轻度石漠化、中度石漠化、强度石漠化和极强度石漠化(熊康宁等,2002)。无明显石漠化和潜在石漠化样地土壤动物组成群落最为复杂(赵基等,2013),主要因为这两种样地石漠化程度较低,土层较厚、土壤水分适中、植被覆盖率高,并且土壤表面有明显的枯枝落叶层,土壤表层疏松,适宜土壤动物的生存与繁衍(樊云龙等,2010)。随着石漠化程度的加重,各研究区的土壤动物类群数有减少的趋势(熊康宁等,2012;陈航等,2016)。在石漠化治理恢复区,土壤动物物种丰富度在石漠化程度高的样地高,但优势度指数在石漠化程度低的样地高(王仙攀等,2012a)。虽然石漠化程度高的样地岩石裸露率高,但封山育林后,植物快速生长,覆盖于土壤表层,植被恢复后土壤动物快速进入土壤,其个体数量增长速度快(赵基等,2013)。在非喀斯特地区,生态系统退化(如过度放牧或盐碱化等)也会导致土壤动物个体密度和类群数降低(吕世海等,2007;吴东辉等,2008;刘任涛等,2013)。喀斯特地区与非喀斯特地区的退化生态系统的土壤动物生态学的研究结果一致,随着石漠化或盐碱化等生态系统退化程度加深,土壤动物个体密度和类群数随之减少。

3 土地利用方式对土壤动物群落的影响

在中国西南喀斯特地区不同的土地利用方式下,土壤动物类群数、个体密度均存在差异,在喀斯特地区的森林生态系统、草地生态系统和农田生态系统中均有所表现(表1)。西南喀斯特地区不同土地利用方式下土壤动物的研究中均呈现一个共同特点:即植被类群越复杂、人为干扰程度越低,土壤动物的个体密度、类群数越高;植被类群越简单、人为干扰程度越高,土壤动物的个体密度、类群数越低。例如不同林地利用方式下,土壤动物的类群数和个

表 1 不同土地利用方式土壤动物个体密度、类群数及多样性指数

Table 1 Individual, group number and diversity index of soil fauna in different land use types

土地利用类型	个体密度 (头·m ⁻²)	类群数 (个)	多样性指数 (%)	数据来源
果木林	1640	23	2.059	庞姝等,2006
杂木林	2184	23	2.151	庞姝等,2006
枞木林	796	19	2.249	庞姝等,2006
草本	3120	13	1.363	叶岳等,2008
灌丛	5984	13	1.075	叶岳等,2008
乔木	3840	14	1.459	叶岳等,2008
农田	12128	13	-	叶岳等,2009
草本	1904	8	-	叶岳等,2009
灌丛	10864	7	-	叶岳等,2009
灌草丛	14700	19	2.540	赵志成等,2010
玉米地	26400	11	2.371	赵志成等,2010
经果林	30500	16	2.772	赵志成等,2010
荒地	18300	10	2.303	赵志成等,2010
退耕地	37900	14	2.640	赵志成等,2010
草坡	25716	15	1.933	兰洪波等,2011
乔灌混交林	47881	19	2.301	兰洪波等,2011
乔木林	30030	22	1.873	兰洪波等,2011
林地撂荒地	10267	10	2.100	杨大星等,2016
草地撂荒地	20337	15	2.300	杨大星等,2016

-表示无相关数据。

体密度在群落结构复杂的杂木林最高,在群落结构简单的枞木林最低(庞姝等,2006)。喀斯特地区不同植被下土壤动物的研究结果显示,灌丛土壤动物个体密度最高,其次是乔木,草本最低;乔木的土壤动物类群数最高(叶岳等,2008)。由此可知,在西南喀斯特地区的生态系统中,生境的复杂程度和外界环境的扰动强度,决定了土壤动物群落的复杂程度,即生境越复杂、扰动越小,土壤动物群落结构也越复杂、个体密度和类群数越高。这与吴东辉等(2004)研究结果一致,生态环境越优越或受人类活动干扰越小,土壤动物群落多样性越高。

4 不同海拔的土壤动物分布特征

中国西南喀斯特地区不同海拔土壤动物的个体密度和类群数呈现较高的异质性(表2)。对喀斯特3种不同海拔地区(贞丰 500~1200 m、清镇 1240~1450 m、毕节 1400~1700 m)土壤动物研究,结果表明,干旱期前,土壤动物个体密度在高海拔的毕节地区最高,类群数在中等海拔的清镇最高,个体密度和类群数在低海拔的贞丰均最低;干旱期后,土壤动物个体密度、类群数在中等海拔的清镇均最高,个体密度、类群数在低海拔的贞丰均最低(赵志成等,2011)。在喀斯特漏斗森林,土壤动物类群数随海

表 2 不同海拔土壤动物个体密度、类群数及多样性指数
Table 2 Individual density, group number and diversity index of soil fauna at different altitudes

样地	海拔 (m)	个体密度 (头·m ⁻²)	类群数 (个)	多样性指数 (%)	数据来源
I	448	91216	20	2.291	刘卫文等,2015
II	625	55448	17	2.110	刘卫文等,2015
III	748	53840	15	1.733	刘卫文等,2015
IV	844	79419	12	1.481	刘卫文等,2015
贞丰(干旱期前)	500~1200	66000	17	1.451	赵志成等,2011
清镇(干旱期前)	1240~1450	91800	19	1.546	赵志成等,2011
毕节(干旱期前)	1400~1700	115600	18	1.192	赵志成等,2011
贞丰(干旱期后)	500~1200	24500	11	0.977	赵志成等,2011
清镇(干旱期后)	1240~1450	40500	13	1.247	赵志成等,2011
毕节(干旱期后)	1400~1700	38100	11	1.225	赵志成等,2011

拔升高而降低(刘卫文等,2015)。因此,在中国西南喀斯特不同海拔地区土壤动物个体密度、类群数各不相同,这种现象可能与中国西南喀斯特地区地形地貌的独特性有关,中国西南喀斯特地区独特的地形地貌造成同一片区域内存在不同的小气候,不同的小气候中土壤的温度、湿度均各异,从而导致不同海拔土壤动物存在异质性(史沉鱼等,2016)。这与 Raschmanová 等(2013,2016)对土壤动物(跳虫)的研究结果一致,各个研究区小气候中土壤的温度和湿度等的不同,导致土壤动物的个体密度存在差异。

5 展 望

中国西南喀斯特地区的生态环境极为脆弱,难恢复、难治理。喀斯特生态系统的恢复和保育是当地政府、学者及人民关注的重点。土壤动物能改良土壤结构、改善土壤通气状况及提高土壤肥力,有利于植物的生长,微生物的生存和繁衍,对喀斯特地区生态环境的保护和恢复具有重大意义。中国西南喀斯特地区土壤动物的研究较晚,但经过国内外学者近 20 年的研究,也取得了丰硕的成果。然而,中国西南喀斯特地区土壤动物的研究仍然不够深入,未来土壤动物生态学研究将亟需关注以下几个方面:

- (1)在中国西南喀斯特地区土壤动物多样性研究中,应结合传统分类方法和现代分子生物学技术。提升喀斯特地区土壤动物分类水平,加强中国西南喀斯特地区地理环境要素和土壤动物分布之间关系的研究。并通过对中国西南喀斯特地区土壤动物在不同土地利用方式下物种生理学变异的研究,进一步揭示中国西南喀斯特地区土壤动物的生物指示作用。
- (2)加强土壤动物多样性在中国西南喀斯特地区中的功能作用及机理研究。中国西南喀斯特地区

石漠化较为严重,但土壤动物物种丰富。目前,土壤动物功能作用从物种角度揭示有较大难度。因此,土壤动物类群对中国西南喀斯特地区生态恢复的功能作用需要进一步研究。

(3)开展中国西南喀斯特地区土壤动物地上-地下生态系统耦合关系的研究,以此揭示土壤动物在喀斯特地区微生态系统中的生态作用及机制。

(4)当前热点环境问题背景下,研究人为干扰、环境污染、外来物种入侵、气候变化等对中国西南喀斯特地区土壤动物类群数、密度及其功能的影响。通过对这些因素对土壤动物影响的研究来预测和实现中国西南喀斯特地区物质循环的可持续性。

参考文献

鲍 乾, 杨 瑞, 聂朝俊, 等. 2017. 贵州喀斯特高原花江峡谷区不同恢复模式的土壤养分特征. 生态学杂志, **36** (08): 2094-2102.

陈 航, 陈 沛, 王鹏举, 等. 2016. 朝营小流域石漠化治理区土壤动物群落结构. 江苏农业科学, **44**(3): 312-317.

樊云龙, 熊康宁, 苏孝良, 等. 2010. 喀斯特高原不同植被演替阶段土壤动物群落特征. 山地学报, **28**(2): 226-233.

傅声雷. 2018. 利用新方法和野外实验平台加强土壤动物多样性及其生态功能的研究. 生物多样性, **26**(10): 1031-1033.

蒋海东, 杨 青, 吕宪国. 2006. 土壤动物在农业生态系统中的研究进展. 土壤通报, **37**(4): 805-808.

兰洪波, 冉景丞, 蒙惠理, 等. 2011. 茂兰喀斯特森林大型土壤动物群落多样性初探. 西南大学学报: 自然科学版, **33**(3): 73-77.

兰洪波, 冉景丞, 杨茂发. 2010. 茂兰喀斯特森林实验区桑园土壤昆虫初步调查. 河南农业科学, **39**(11): 54-56.

李红月, 殷秀琴, 马 辰, 等. 2017. 长白山地丘陵区不同土地利用方式土壤动物群落生态分布特征. 土壤学报, **54**

- (4): 1018–1028.
- 李晓东, 莫海玲, 覃国乐, 等. 2016. 宜州市喀斯特地貌桑园土壤动物群落季节动态与害虫生态调控. 贵州农业科学, **44**(10): 50–53.
- 刘任涛, 朱凡, 赵哈林. 2013. 北方农牧交错区土地利用覆盖变化对大型土壤动物群落结构的影响. 草地学报, **21**(4): 643–649.
- 刘卫文, 兰洪波, 宋丽莎, 等. 2015. 茂兰喀斯特漏斗森林不同海拔大型土壤动物分布研究. 现代农业科技, (1): 170–172.
- 龙健, 江新荣, 邓启琼, 等. 2005. 贵州喀斯特地区土壤石漠化的本质特征研究. 土壤学报, **42**(3): 419–427.
- 吕世海, 卢欣石, 高吉喜. 2007. 呼伦贝尔草地风蚀沙化土壤动物对环境退化的响应. 应用生态学报, **18**(9): 2055–2060.
- 聂立凯, 于政达, 孔范龙, 等. 2019. 土壤动物对土壤碳循环的影响研究进展. 生态学杂志, **38**(3): 882–890.
- 庞姝, 任红, 谢伟, 等. 2006. 湘西吉首喀斯特地貌区4种典型生境的土壤动物调查. 生命科学研究, **10**(4): 333–337.
- 尚艳芳. 2010. 土壤线虫群落对大连石门山森林植被恢复的响应(硕士学位论文). 大连: 辽宁师范大学.
- 史沉鱼, 李晓东, 覃国乐, 等. 2016. 广西喀斯特地区甘蔗园土壤动物群落多样性及季节动态. 南方农业学报, **47**(6): 941–946.
- 宋理洪, 王可洪, 闫修民. 2018. 基于 Meta 分析的中国西南喀斯特地区土壤动物群落特征研究. 生态学报, **38**(3): 984–990.
- 唐政, 李忠芳, 胡宁, 等. 2018. 喀斯特生态恢复下土壤大型动物群落结构与基本肥力的协同恢复. 南方农业学报, **49**(4): 669–675.
- 王世杰, 李阳兵, 李瑞玲. 2003. 喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理. 第四纪研究, **23**(6): 657–666.
- 王仙攀, 陈浒, 熊康宁, 等. 2012a. 喀斯特石漠化地区土壤动物功能类群及培育研究. 干旱区资源与环境, **26**(12): 191–195.
- 王仙攀, 熊康宁, 陈浒, 等. 2012b. 贵州喀斯特高原峡谷石漠化地区土壤动物功能类群研究. 中国农学通报, **28**(5): 252–257.
- 吴东辉, 胡克, 殷秀琴. 2004. 松嫩草原中南部退化羊草草地生态恢复与重建中大型土壤动物群落生态特征. 草业学报, **13**(5): 121–126.
- 吴东辉, 尹文英, 殷秀琴. 2008. 松嫩草原中度退化草地不同植被恢复方式下土壤跳虫群落特征比较. 昆虫学报, **51**(5): 509–515.
- 熊康宁, 陈浒, 王仙攀, 等. 2012. 喀斯特石漠化治理区土壤动物的时空格局与生态功能研究. 中国农学通报, **28**(23): 259–265.
- 熊康宁, 黎平, 周忠发, 等. 2002. 喀斯特石漠化的遥感 GIS 典型研究——以贵州省为例. 北京: 地质出版社.
- 许还. 2018. 长白山地典型农田生态系统土壤跳虫群落组成及其生态分布特征(硕士学位论文). 长春: 东北师范大学.
- 严莹, 李恺, 方燕. 2010. 浙江百山祖自然保护区不同海拔土壤动物群落结构及季节动态. 生态学杂志, **29**(9): 1754–1761.
- 杨旭, 林琳, 张雪萍, 等. 2016. 松嫩平原典型黑土耕作区中小型土壤动物时空分布特征. 生态学报, **36**(11): 3253–3260.
- 杨大星, 杨茂发, 尚小丽, 等. 2012. 黔南喀斯特不同火烧迹地土壤动物群落特征比较. 西南农业学报, **25**(6): 2190–2197.
- 杨大星, 杨茂发. 2016. 黔南不同撂荒地土壤节肢动物群落特征. 贵州农业科学, **44**(6): 149–154.
- 杨大星, 杨文佳, 叶婷, 等. 2019. 火烧干扰对喀斯特地区大型土壤节肢动物群落的影响. 生态学杂志, **38**(3): 680–688.
- 叶岳, 周运超, 武绍义, 等. 2009. 黔南喀斯特地区不同土地利用方式下大型土壤动物功能类群研究. 河南农业科学, **38**(3): 47–51.
- 叶岳, 周运超. 2008. 黔中石灰岩地区植被下大型土壤动物群落多样性. 农业现代化研究, **29**(3): 361–364.
- 尹文英. 2000. 中国土壤动物. 北京: 科学出版社.
- 战丽莉, 许艳丽, 张兴义, 等. 2012. 耕作方式对中小型土壤动物多样性影响. 生态学杂志, **31**(9): 2371–2377.
- 张智英, 张亮, 李玉辉, 等. 2005. 云南石林喀斯特景区不同生境大型土壤动物多样性研究. 林业科学研究, **18**(6): 701–705.
- 赵基, 陈浒, 徐玲, 等. 2013. 朝营小流域不同等级石漠化土壤动物群落结构. 贵州农业科学, **41**(6): 127–130.
- 赵志成, 熊康宁, 陈浒, 等. 2010. 清镇市不同土地利用方式下土壤动物的群落结构. 贵州农业科学, **38**(6): 116–120.
- 赵志成, 熊康宁, 陈浒, 等. 2011. 干旱对贵州喀斯特石漠化生态治理区土壤动物的影响. 西南农业学报, **24**(3): 1167–1172.
- 庄海峰. 2010. 落叶松和水曲柳人工林土壤动物群落生态以及施氮肥的影响(硕士学位论文). 哈尔滨: 东北林业大学.
- Alexandra L, De BL. 1997. The status of soil macrofauna as indicators of soil health to monitor the sustainability of Australian agricultural soils. *Ecological Economics*, **23**: 167–178.
- Decaens T, Jiménez JJ, Gioia C, et al. 2006. The values of soil animals for conservation biology. *European Journal of Soil Biology*, **42**: S23–S38.
- He XY, Wang KL, Zhang W, et al. 2008. Positive correlation between soil bacterial metabolic and plant species diversity and bacterial and fungal diversity in a vegetation succession on Karst. *Plant and Soil*, **307**: 123–134.
- Hosoishi S, Tasen W, Park S, et al. 2015. Annual fire resilience of ground-dwelling ant communities in Hiraodai Karst Plateau grassland in Japan. *Entomological Science*, **18**: 254–261.
- Kováč L, Kostúrová N, Miklisová D. 2005. Comparison of collembolan assemblages (Hexapoda, Collembola) of thermophilous oak woods and *Pinus nigra* plantations in the

- Slovak Karst (Slovakia). *Pedobiologia*, **49**: 29–40.
- Larson C. 2011. An unsung carbon sink. *Science*, **334**: 886–887.
- Ning H, Hui L, Zheng T, *et al.* 2016. Community diversity, structure and carbon footprint of nematode food web following reforestation on degraded Karst soil. *Scientific Reports*, **6**: 28138.
- Pankhurst CE, Hawke BG, McDonald HJ, *et al.* 1995. Evaluation of soil biological properties as potential bioindicators of soil health. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, **35**: 1015–1028.
- Raschmanová N, Kováč L, Miklisová D. 2008. The effect of mesoclimate on Collembola diversity in the Zádiel Valley, Slovak Karst (Slovakia). *European Journal of Soil Biology*, **44**: 463–472.
- Raschmanová N, Miklisová D, Kováč L, *et al.* 2015. Community composition and cold tolerance of soil Collembola in a collapse karst doline with strong microclimate inversion. *Biologia*, **70**: 802–811.
- Raschmanová N, Miklisová D, Kováč L. 2013. Soil Collembola communities along a steep microclimatic gradient in the collapse doline of the Silická ľadnica Cave, Slovak Karst (Slovakia). *Biologia*, **68**: 470–478.
- Raschmanová N, Miklisová D, Kováč L. 2016. Dynamics of soil Collembola communities (Hexapoda: Collembola) along the mesoclimatic gradient in a deep karst valley. *Biologia*, **71**: 184–193.
- Sumner ME. 2000. Handbook of soil science. Boca Raton: CRC Press.
- Zhao J, Li S, He X, *et al.* 2014. The soil biota composition along a progressive succession of secondary vegetation in a karst area. *PLoS One*, **9**: e112436.
- Zhao J, Xun R, He X, *et al.* 2015. Size spectra of soil nematode assemblages under different land use types. *Soil Biology & Biochemistry*, **85**: 130–136.
-
- 作者简介** 戴祥艳,女,1993年生,硕士研究生,研究方向为土壤生态。E-mail: 1220049050@qq.com
- 责任编辑** 李凤芹
-