

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第2期 Vol.33 No.2 **2013**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 2 期 2013 年 1 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 岩溶山区水分时空异质性及植物适应机理研究进展..... 陈洪松, 聂云鹏, 王克林 (317)
- 红树林植被对大型底栖动物群落的影响 陈光程, 余 丹, 叶 勇, 等 (327)
- 淡水湖泊生态系统中砷的赋存与转化行为研究进展..... 张 楠, 韦朝阳, 杨林生 (337)
- 纳米二次离子质谱技术(NanoSIMS)在微生物生态学研究中的应用 胡行伟, 张丽梅, 贺纪正 (348)
- 城市系统碳循环: 特征、机理与理论框架 赵荣钦, 黄贤金 (358)
- 城市温室气体排放清单编制研究进展..... 李 晴, 唐立娜, 石龙宇 (367)

个体与基础生态

- 科尔沁沙地家榆林的种子散布及幼苗更新..... 杨允菲, 白云鹏, 李建东 (374)
- 环境因子对木棉种子萌发的影响 郑艳玲, 马焕成, Scheller Robert, 等 (382)
- 五花米草与短叶荳蔻落物分解过程中碳氮磷化学计量学特征 欧阳林梅, 王 纯, 王维奇, 等 (389)
- 性别、季节和体型大小对吐鲁番沙虎巢域的影响 李文蓉, 宋玉成, 时 磊 (395)
- 遮蔽行为对海刺猬摄食、生长和性腺性状的影响..... 罗世滨, 常亚青, 赵 冲, 等 (402)
- 水稻和玉米苗上饲养的稻纵卷叶螟对温度的反应 廖怀建, 黄建荣, 方源松, 等 (409)

种群、群落和生态系统

- 亚热带不同林分土壤表层有机碳组成及其稳定性 商素云, 姜培坤, 宋照亮, 等 (416)
- 禁牧条件下不同类型草地群落结构特征 张鹏莉 陈 俊 崔树娟, 等 (425)
- 高寒退化草地狼毒与赖草种群空间格局及竞争关系 任 珩, 赵成章 (435)
- 小兴安岭 4 种典型阔叶红松林土壤有机碳分解特性 宋 媛, 赵溪竹, 毛子军, 等 (443)
- 新疆富蕴地震断裂带植被恢复对土壤古菌群落的影响 林 青, 曾 军, 张 涛, 等 (454)
- 长期施肥对紫色土农田土壤动物群落的影响 朱新玉, 董志新, 况福虹, 等 (464)
- 潮虫消耗木本植物凋落物的可选择性试验 刘 燕, 廖允成 (475)
- 象山港网箱养殖对近海沉积物细菌群落的影响 裘琼芬, 张德民, 叶仙森, 等 (483)
- 2005 年夏季东太平洋中国多金属结核区小型底栖生物研究 王小谷, 周亚东, 张东声, 等 (492)
- 川西亚高山典型森林生态系统截留水文效应 孙向阳, 王根绪, 吴 勇, 等 (501)

景观、区域和全球生态

- 中国水稻生产对历史气候变化的敏感性和脆弱性 熊 伟, 杨 婕, 吴文斌, 等 (509)
- 1961—2005 年东北地区气温和降水变化趋势 贺 伟, 布仁仓, 熊在平, 等 (519)
- 地表太阳辐射减弱和臭氧浓度增加对冬小麦生长和产量的影响 郑有飞, 胡会芳, 吴荣军, 等 (532)

资源与产业生态

- 基于环境卫星数据的黄河湿地植被生物量反演研究 高明亮, 赵文吉, 官兆宁, 等 (542)
- 黄土高原南麓县域耕地土壤速效养分时空变异 陈 涛, 常庆瑞, 刘 京, 等 (554)

不同水稻栽培模式下小麦秸秆腐解特征及对土壤生物学特性和养分状况的影响..... 武 际,郭熙盛,鲁剑巍,等 (565)

施氮时期对高产夏玉米光合特性的影响 吕 鹏,张吉旺,刘 伟,等 (576)

城乡与社会生态

城市景观组分影响水质退化的阈值研究 刘珍环,李正国,杨 鹏,等 (586)

长株潭地区生态可持续性 戴亚南,贺新光 (595)

外源 NO 对镉胁迫下水稻幼苗抗氧化系统和微量元素积累的影响 朱涵毅,陈益军,劳佳丽,等 (603)

达里诺尔湖沉积物中无机碳的形态组成 孙园园,何 江,吕昌伟,等 (610)

绿洲土 Cd、Pb、Zn、Ni 复合污染下重金属的形态特征和生物有效性 武文飞,南忠仁,王胜利,等 (619)

柠檬酸和 EDTA 对铜污染土壤环境中吊兰生长的影响 汪楠楠,胡 珊,吴 丹,等 (631)

研究简报

海州湾生态系统服务价值评估 张秀英,钟太洋,黄贤金,等 (640)

内蒙古羊草群落、功能群、物种变化及其与气候的关系 谭丽萍,周广胜 (650)

氮磷供给比例对长白落叶松苗木磷素吸收和利用效率的影响 魏红旭,徐程扬,马履一,等 (659)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 352 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 38 * 2013-01



封面图说: 科尔沁沙地榆树——榆树疏林草原属温带典型草原地带,适应半干旱半湿润气候的隐域性沙地顶级植物群落,具有极强的适应性、稳定性,生物产量较高。在我国仅见于科尔沁沙地和浑善达克沙地。是防风固沙、保护沙区生态环境和周边土地资源的一种重要的植物群落类型,是耐旱沙生植物的重要物种基因库和荒漠野生动物的重要避难所和栖息地。这些年来,由于人类毁林开荒、过度放牧、甚至片面地建立人工林群落等的干扰,不同程度地破坏了榆树疏林的生态环境,影响了其特有的生态作用。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201112071873

朱新玉,董志新,况福虹,朱波. 长期施肥对紫色土农田土壤动物群落的影响. 生态学报, 2013, 33(2): 0464-0474.

Zhu X Y, Dong Z X, Kuang F H, Zhu B. Effects of fertilization regimes on soil faunal communities in cropland of purple soil, China. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 0464-0474.

长期施肥对紫色土农田土壤动物群落的影响

朱新玉^{1,2}, 董志新¹, 况福虹¹, 朱 波^{1,*}

(1. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 山地环境演变与调控重点实验室, 成都 610041;

2. 商丘师范学院环境与规划学院, 商丘 476000)

摘要: 土壤动物在陆地生态系统物质循环和能量流动中起着重要作用, 直接或间接的参与土壤有机质的分解与矿化; 长期施肥对土壤理化性质产生影响的同时, 改变了土壤动物群落组成。为查明紫色土长期施肥对土壤动物群落的影响及其响应关系, 于 2008 年的 5、7、9 和 11 月分别对紫色土农田无肥对照(CK)、单施氮肥(N)、常规化肥氮磷钾(NPK)、有机肥(OM)、有机肥与化肥氮磷钾混施(OMNPK)、秸秆还田(RSD)和秸秆还田与化肥氮磷钾混施(RSDNPK)等 7 种长期施肥定位试验地的土壤动物群落进行调查, 采用改良的干漏斗和湿漏斗两种方法, 共获得土壤动物 9454 只, 隶属 7 门 17 纲 24 目。分析表明, OM 和 RSDNPK 两种施肥方式下土壤动物群落的多样性显著高于 CK、N 和 NPK 等 3 种施肥方式, 说明有机物料的长期投入有利于提高土壤动物群落丰富度和多样性。方差分析表明施肥方式对土壤动物主要类群密度的影响差异性极显著($F=42.412$, $P=0.0001$), 对土壤动物群落类群影响存在不均衡性。施肥方式主要影响农田土壤动物类群的种群个体数量、线虫动物门个体数量、大蚓类个体数量、甲螨亚目个体数量、密度-类群指数 DG 及土壤动物群落类群数等六个指标, 初步认为这些主要类群因素能够预测长期施肥引起的土壤肥力变化, 可能对指示土壤质量的变化具有一定潜力。

关键词: 土壤动物; 施肥方式; 主成分分析; 紫色土

Effects of fertilization regimes on soil faunal communities in cropland of purple soil, China

ZHU Xinyu^{1,2}, DONG Zhixin¹, KUANG Fuhong¹, ZHU Bo^{1,*}

1 Key Laboratory of Environmental Evolution and Regulation, Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

2 College of Environment and Planning, Shangqiu Normal University, Shangqiu 476000, China

Abstract: Soil fauna regulate soil processes affecting soil organic matter decomposition, mineralization and nutrient cycling, and play an important role in terrestrial ecosystem nutrient cycling and energy flow. Management of cropland, especially long-term fertilization, has considerable impacts on soil properties, and also affects the composition of soil faunal communities. The Sichuan Basin is an important agribusiness area in southwestern China which occupies 7% of the national cropland and supplies 10% of the agricultural products of China. The typical soil in the study area is highly productive and is called “purple soil” locally. It is classified as a Pup-Orthic Entisol in the Chinese Soil Taxonomy and an Entisol in the U.S. Taxonomy. However, the influence of long-term fertilization regimes on soil faunal communities and how indices of these soil faunal communities respond to changes in soil properties are poorly understood. To investigate the effects of long-term fertilization regimes on the soil faunal communities and their inter-relationships, seven fertilization regimes, a control

基金项目: 国家重点基础研究发展计划课题(2012CB417101); 国家科技支撑计划项目((2011BAD31B03)); 商丘师范学院 2011 年度青年科学基金资助(2011QN21)

收稿日期: 2011-12-07; 修订日期: 2012-07-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: bzhu@imde.ac.cn

with no fertilization (Control Check, CK), nitrogen fertilizer only (Nitrogen, N), a mixed synthetic fertilizer (Nitrogen Phosphorus Potassium, NPK), organic manure (Organic Manure, OM), organic manure plus synthetic fertilizer (Organic Manure Nitrogen Phosphorus Potassium, OMNPK), crop residues returned to the soil as fertilizer (Returning Straw Decomposition, RSD) and crop residues plus synthetic fertilizer (Returning Straw Decomposition Nitrogen Phosphorus Potassium, RSDNPK) were applied to the purple soil of the Sichuan Basin, China, and examined in May, July, September and November, 2008 using modified Tullgren and Baermann funnels. A total of 9,454 individuals were collected, and classified into seven phyla, 17 classes and 24 orders. Analysis of the data showed that the soil faunal communities were richer in the OM, OMNPK and RSDNPK plots, and that the greatest diversity of the soil faunal communities was found in the OM and RSDNPK plots, being significantly higher than those in the CK, N and NPK plots. Application of organic fertilizers promoted diversity and abundance of soil faunal communities, and was favorable for their survival and development. Analysis of variance indicated that different fertilization regimes had extremely significant impacts on the density of the main soil faunal groups ($F=42.412$, $P=0.0001$) and led to imbalances being present in the soil faunal groups. Analysis of the relationships between the fertilization regimes and the main groups of the soil faunal communities, using Principal Component Analysis, showed that the different fertilization regimes primarily affected six indices of soil fauna; individuals in the soil faunal population, individual nematodes, individual megadriles, individual Oribatidas, the DG index (density-group diversity index) and total groups in the soil faunal communities. Therefore, we consider that changes in the cropland soil faunal communities have a relationship with differences in long-term fertilization management. These six indices of the individual soil fauna population; individual Nematodes, individual Megadriles, individual Oribatidas, the DG index (density-group diversity index) and total groups in the soil faunal communities can be used to predict changes of soil fertility caused by long-term fertilization application, and have great potential as bio-indicators of changes in soil quality.

Key Words: soil fauna; fertilization regimes; principal component analysis; purple soil

土壤动物在土壤形成和发育过程中起主导作用,并以其复杂的功能群直接或间接参与土壤有机质的分解和矿化作用,在农业生态系统中具有重要作用^[1-2]。目前,施肥仍是现代农业补充土壤养分、提高农作物产量行之有效的方法,施肥对土壤理化性质产生影响的同时,也改变了土壤动物群落组成及土壤动物的生存环境^[3-5]。同时,农业管理方式影响着土壤动物的分布、种类和数量,农田土壤动物群落多样性的变化也与农业管理措施密不可分^[6-9]。

长期施用有机肥导致稀树草原区蚯蚓和捕食性土壤动物增加^[10];连续施用氮磷肥显著降低了土壤线虫和土壤原生动动物数量^[11]。Gudleifsson^[12]的研究表明,长期施肥导致了一些无脊椎动物数量的减少,增加了如弹尾目和蛴螬目等类群的数量,而高氮量施肥对中型蛴螬类的生存发展有不利影响^[13]。长期施肥对农田土壤动物个体总数影响较大,对土壤动物群落多样性和丰富度的影响较小^[9];但朱强根等^[5]研究表明,有机肥或有机肥配施化肥有利于土壤动物群落多样性和丰富度的提高。此外,土壤动物作为土壤中重要的生物群落,对土壤质量的变化起着指示作用,其群落的个体数量,丰富度和多样性等可作为土壤质量评价的重要指标^[14-16]。可见,长期施肥与农田土壤动物群落多样性之间的关系已引起重视,但土壤动物群落指标对施肥方式的响应研究尚不多见^[9]。而长期施肥可能造成土壤质量变化,但土壤质量指标与施肥方式及土壤动物群落指标之间是否存在明确的响应关系并不清楚。

紫色土广泛分布在我国南方低山丘陵区,集中分布在四川盆地,面积约 16 万 km²^[17]。紫色土矿质养分含量丰富,由于亚热带季风气候条件与紫色土资源的组合使该区成为农业宜种性广,物产丰富,是长江上游地区乃至西南地区最重要农业区域^[18]。但由于紫色土有机质及氮素含量较低,土地垦殖指数高,施肥仍是该区保持和提高农作物产量的重要措施。长期施肥造成紫色土土壤环境的变化,也必然导致土壤理化性质的改变。

土壤动物对土壤生态环境的变化具有较敏感响应,但有关紫色土长期施肥对土壤动物的影响研究还很缺乏^[19]。因此,本文基于长期施肥试验,在调查不同施肥方式土壤动物群落资源状况基础上,分析农田土壤动物群落及主要土壤动物类群与土壤主要养分之间的关系,探讨长期施肥方式下土壤理化性质变化对土壤动物群落的影响及其作用机制;为紫色土农田生物多样性保护与维持、土壤质量保育及高效施肥提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验点位于中国科学院盐亭紫色土生态农业试验站(105°28' E, 31°16' N)内。属中亚热带湿润季风气候,由钙质紫色沉积母质发育而成的紫色土分布广泛;平均气温 17.13℃,极端最高气温 40℃,极端最低气温 -5.11℃;多年平均降雨量 826 mm,降水季节分布不均,春季占 5.2%,夏季 65.2%,秋季 19.2%,冬季 8.2%,无霜期 294 d^[20]。土壤为蓬莱镇组紫色土,质地为中壤,土层较浅为 20—80 cm。植被为人工桉木(*Alder cremastogyne*)、柏木(*Cypresses funebris*)混交林,主要农作物有水稻(*Oryza sativa*)、玉米(*Zea mays* L.)、小麦(*Triticum aestivum*)、甘薯(*Ipomoea batatas* Lam.)、油菜(*Brassica campestris* L.)。

1.2 试验设计

长期施肥试验布置在紫色土坡地养分平衡场中进行,小区面积 6 m×4 m,施肥试验始于 2002 年。各小区土层深度均为 60 cm,主要施肥处理为:不施肥处理(CK)、单施氮肥(N)、氮磷钾复合肥(NPK)、单施有机肥(OM)(猪粪)、有机肥-化肥配施(OMNPK)、秸秆还田(RSD)、秸秆-化肥混施(RSDNPK),施肥方案见表 1。各处理作物收获后一次性施入肥料,秸秆还田利用当年大田收获作物的秸秆,每个处理随机安排 3 个重复,施氮肥处理控制同一施氮水平,猪粪与秸秆施入前采样测定总氮含量,计算有机肥与秸秆的总氮量并计入施氮量,确保各施肥处理的等氮量。种植制度为冬小麦-夏玉米轮作。

表 1 有机肥、化肥与秸秆还田施肥配比方案

Table 1 Application rates of synthetic fertilizer, manure and crop residues

施肥方式 Treatment	夏玉米 Summer maize					
	化肥 Synthetic fertilizers/(kg/hm ²)			农家肥 Pig slurry	秸秆还田 Crop straw	总氮量 Total nitrogen
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	T/hm ²	returned T/hm ²	/(kg/hm ²)
CK	—	—	—	—	—	—
N	150	—	—	—	—	150
NPK	150	90	36	—	—	150
OM	—	—	—	50 (152 kg N)	—	152
OMNPK	90	90	36	20 (61 kg N)	—	151
RSD	—	—	—	—	7.5 (151 kg N)	151
RSDNPK	90	90	36	—	3.0 (60 kg N)	150
施肥方式 Treatment	冬小麦 Winter wheat					
	化肥 Synthetic fertilizers/(kg/hm ²)			农家肥 Pig slurry	秸秆还田 Crop straw	总氮量 Total nitrogen
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	T/hm ²	returned T/hm ²	/(kg/hm ²)
CK	—	—	—	—	—	—
N	130	150	—	—	—	130
NPK	130	150	36	—	—	130
OM	—	152	—	43.5 (131 kg N)	—	131
OMNPK	78	151	36	17.5 (53 kg N)	—	131
RSD	—	151	—	—	6.5 (132 kg N)	132
RSDNPK	78	150	36	—	2.5 (51 kg N)	129

CK: 无肥对照 Control check; N: 单施氮肥 Nitrogen; NPK: 常规施肥 Nitrogen phosphorus potassium; OM: 单施有机肥 Organic manure; OMNPK: 有机肥-化肥配施 Organic manure nitrogen phosphorus potassium; RSD: 秸秆还田 Returning straw decomposition; RSDNPK: 秸秆-化肥混施 Returning straw decomposition nitrogen phosphorus potassium

1.3 样品采集与鉴定

分别在 2008 年的 5、7、9、11 月份采集土壤样品,5 月和 9 月分别为小麦和玉米成熟收获后采集。每个调

查样地设 1 个 50 cm×50 cm 样方,用体积为 100 cm³ 的自制采样器自上而下分 3 层(0—5 cm、5—10 cm 和 10—15 cm)每点每层取 100 cm³ 土样,湿生土壤动物用体积为 50 cm³ 的自制采样器每个点每层取 50 cm³ 土样,三次重复。每个样地采集 3 个土壤样品,用以测定土壤速效养分和土壤全量养分;三次重复,所取土样装入塑料袋,贴好标签带回实验室。

运用改良的干漏斗装置(Tullgren)和湿漏斗装置(Baremann),在 60 W 的白炽灯下烘 24 h,进行干性中小型土壤动物和湿生土壤动物的分离,收集标本保存在 75% 酒精中。所有分离样品均在显微镜(奥林巴斯体视双目显微镜 SZ16)和解剖镜下鉴定、计数。土壤动物鉴定依据《中国土壤动物检索图鉴》^[21]、《幼虫分类学》^[22]等,除线虫类外,其余绝大部分均鉴定到科,并统计个体数量。按照刘光崧所著《中国理化分析与剖面描述》^[23]分析土壤理化性质。

1.4 数据处理

1) 土壤动物多样性指数^[24]

$$H' = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i$$

式中, S 为所有的物种数; P_i 为第 i 个物种的多度比例。

2) Pielou 均匀度指数^[24]

$$J = H' / \ln S$$

式中, S 为所有的物种数; H' 为多样性指数。

采用 Bonferroni 修正差别检验法,即将土壤动物数量转化为 $\lg(x+1)$ 后进行方差分析以判断不同施肥处理之间的显著性差异。

3) 密度-类群指数(DG)^[24]

$$DG = (g/G) \sum (D_i C_i / D_{i\max} C)$$

式中, D_i 为第 i 类群的密度; $D_{i\max}$ 为各群落中第 i 类群的最大密度; C_i/C 表示在个群落中第 i 个类群出现的比率; g 为群落中类群数; G 为各群落所包含的总类群数,每个类群在各群落中的最大相对密度为 1。

4) 利用主成分分析原理分析不同施肥方式对土壤动物群落和主要土壤动物类群的影响。

所有运算,采用 SPSS 16.0 和 Excel 2003 软件进行处理,多重比较利用 LSD 法,文中小写字母相同代表差异不显著($P>0.05$),字母不同代表差异显著($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 土壤主要理化性质

各施肥处理的主要土壤理化性质列于表 2;施肥方式对土壤理化性质的影响大。长期施用有机肥或秸秆还田处理(OM、OMDPK、RSDNPK)的土壤有机质、有效磷、速效钾含量显著高于 CK、NPK 和 N 等施肥方式($P<0.05$);对土壤总氮、总磷和总钾含量影响较小,未达到显著水平($P>0.05$);对土壤容重和孔隙度有显著影响,无机肥配施有机肥或秸秆还田使土壤容重降低,孔隙度增加;CK 处理的各项指标最低,这与其长期无任何外源营养物质输入有密切关系。因此,NPK 化肥与有机肥配合施用的施肥方式是提高紫色土土壤肥力和改善土壤质量的重要措施。

2.2 施肥对农田土壤动物群落多样性的影响

采用多样性指数、均匀型指数和丰富度指数,即 Shannon-Wiener 指数(H')、Pielou 均匀度指数(J)和 Margalef 丰富度指数(d)等指标分析不同施肥方式对土壤动物群落多样性的影响。表 3 为土壤动物群落多样性、均匀度与丰富度指数的计算结果。土壤动物群落多样性和均匀度最高的施肥方式为 RSDNPK,其次是 OM,CK 小区土壤动物群落多样性和均匀性最低(表 3);OM 和 RSDNPK 施肥方式下土壤动物群落 Shannon-Wiener 多样性指数(H')显著高于 CK、N 和 NPK 处理($P<0.05$),其它施肥方式之间无显著差异($P>0.05$);RSDNPK 施肥处理的土壤动物群落均匀度指数(J)显著高于单施 N 和无肥对照 CK($P<0.05$);对于土壤动物

丰富度指数(d), RSDNPK 和 NPK 施肥处理最高, 且显著高于 CK ($P < 0.05$), 其它施肥处理间土壤动物丰富度无显著差异 ($P > 0.05$)。表明长期施肥方式的不同改变了农田土壤动物群落结构。

表 2 不同施肥方式下主要土壤理化性质 (2008)

Table 2 Main soil properties under different fertilizer regimes

施肥处理 Treatments	CK	N	NPK	OM	OMNPK	RSD	RSDNPK
SOM/(g/kg)	7.71c	9.84b	8.87bc	10.20ab	10.20ab	10.88a	10.90a
TN/(g/kg)	0.64a	0.78a	0.70a	0.77a	0.74a	0.76a	0.71a
TP/(g/kg)	0.63a	0.72a	0.75a	0.72a	0.73a	0.69a	0.75a
TK/(g/kg)	20.32a	19.99a	21.63a	19.99a	19.55a	19.63a	20.07a
AN/(mg/kg)	39.24a	44.32a	39.98a	43.21a	42.29a	43.11a	45.12a
AP/(mg/kg)	4.19b	4.38b	5.76b	10.44a	12.33a	4.71b	10.30a
AK/(mg/kg)	78.33b	76.55b	87.48b	86.88b	95.45ab	138.87a	132.84a
SBD/(g/cm ³)	1.38b	1.33b	1.32b	1.31b	1.28ab	1.18a	1.26ab
SP/%	49.27b	50.30ab	48.02b	50.30ab	51.52ab	55.65a	51.63ab

SOM: 土壤有机质 Soil organic matter; TN: 土壤总氮 Total nitrogen; TP: 土壤总磷 Total phosphorus; TK: 土壤总钾 Total potassium; AN: 土壤碱解氮 Available nitrogen; AP: 土壤有效磷 Available phosphorus; AK: 土壤速效钾 Available potassium; SBD: 土壤容重 Soil bulk density; SP: 土壤孔隙度 Soil porosity; 各行相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$);

表 3 土壤动物群落多样性与均匀度 (mean $\pm$ standard error)

Table 3 Diversity and evenness of soil fauna community (mean $\pm$ standard error)

施肥处理 Fertilization regimes	类群数(S) Groups	密度/(个/m ²) Density	香浓维纳指数(H') Shannon-Wiener	均匀度(J) Evenness	丰富度(d) Abundance
OM	36	14116	1.77 $\pm$ 0.06 a	0.49 $\pm$ 0.01 ab	4.33 $\pm$ 0.22 ab
OMNPK	41	14752	1.64 $\pm$ 0.21 ab	0.44 $\pm$ 0.07 ab	4.87 $\pm$ 0.05 ab
RSD	39	17504	1.60 $\pm$ 0.11 ab	0.48 $\pm$ 0.04 ab	4.53 $\pm$ 0.01 ab
RSDNPK	46	20408	1.93 $\pm$ 0.07 a	0.60 $\pm$ 0.01 a	5.27 $\pm$ 0.30 a
N	35	10056	1.34 $\pm$ 0.12 b	0.37 $\pm$ 0.03 b	4.34 $\pm$ 0.33 ab
NPK	43	12988	1.39 $\pm$ 0.14 b	0.43 $\pm$ 0.05 ab	5.19 $\pm$ 0.29 a
CK	35	10156	1.26 $\pm$ 0.31 b	0.35 $\pm$ 0.10 b	4.28 $\pm$ 0.26 b

各行相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$)

2.3 施肥对土壤动物主要类群密度的影响

为探讨土壤动物群落的主要类群受长期施肥方式的影响, 选择出优势类群和常见类群 (个体数量占全部捕获量 10% 以上为优势类群, 介于 1%—10% 之间为常见类群), 即线虫动物门、线蚓类、大蚓类、蚁科、等节跳科、甲螨亚目、前气门亚目和中气门亚目等 8 类, 对比分析不同施肥方式下土壤动物种群密度差异。方差分析表明 (表 4), 施肥方式与土壤动物主要类群的密度差异达极显著水平 ($F = 42.412, P = 0.0001$); 土壤动物主要类群之间的种群密度差异也达极显著水平 ($P = 0.003$)。

表 4 不同施肥方式下土壤动物主要类群密度的方差分析

Table 4 Variance analyses on soil fauna densities under different fertilization regimes

变异来源 Source	SS	df	MS	F	P
总变异 Model	2500618	55	45465.790	42.412	0.0001
施肥方式 Fertilizations	46458.45	6	7743.075	7.223	0.004
土壤动物类群 Soil fauna groups	2216040	7	316577.088	295.316	0.003
施肥 $\times$ 类群 Fertilizations $\times$ groups	238120.21	42	5669.529	5.289	0.000
误差 Error	120063.30	112	1071.994		
总和 Corrected Total	2620681.62	167			

SS: 离均差平方和 Sum of Squares; df: 自由度 Degree of freedom; MS: 均方 Mean Squares; F: 统计量 F Statistics; P: 显著度 Significance

对不同施肥方式下土壤动物主要类群密度的差异性进行检验,结果见表 5。除 RSD 施肥方式以外, RSDNPK 施肥方式的土壤动物密度与其它施肥方式的差异达极显著水平($P<0.01$);OMNPK 施肥方式的土壤动物密度除与 NPK 施肥方式差异不显著外($P>0.05$),与其它施肥方式的差异也极显著($P<0.01$)。CK 土壤动物密度除与 N 和 NPK 施肥方式无显著差异外($P>0.05$),与其它小区均有极显著差异($P<0.01$)。可见,施肥方式对土壤动物主要类群密度有显著影响;有机肥施用和有机肥(包括秸秆还田)与化肥(NPK)配施各处理的土壤动物种群密度与化肥处理的土壤动物种群密度差异显著。

表 5 不同施肥处理的主要土壤动物种群密度多重比较

Table 5 Multiple comparisons on soil fauna densities in different fertilization regimes

施肥方式 Fertilization regimes	CK	N	OM	RSD	NPK	OMNPK	RSDNPK
CK	1						
N	-8.04	1					
OM	20.93 *	25.46 **	1				
RSD	36.08 **	44.12 **	-18.76	1			
NPK	10.12	-18.17	7.29	25.96 **	1		
OMNPK	25.72 **	21.71 *	3.75	-22.42 *	3.54	1	
RSDNPK	41.62 **	49.67 **	-24.21 **	-5.54	31.50 **	-27.96 **	1

2.4 土壤动物群落指标对施肥方式的响应

利用主成分分析方法对土壤动物优势类群和常见类群的个体数量(线虫动物门、线蚓类、大蚓类、蚁科、等节跳科、甲螨亚目、前气门亚目和中气门亚目等 8 种)、土壤动物群落类群数 GN、土壤动物群落总个体数量 TI、Shannon-wiener 多样性指数(H')、均匀度指数(J)、群落密度-类群指数 DG 和丰富度指数(d)等 14 个因子进行统计,结果见表 6 和 7。

前两个特征值的特征根值均大于 1,自第三个特征值根开始明显减少,且前两个主成分的累积贡献率达到 95.39%(表 5),说明前两个主成分保留了 95.39%的原始信息,损失信息仅有 4.61%,因此,分析前两个主成分指标即可确定施肥方式对土壤动物群落主要类群的多样性与个体数量的影响。

表 6 变量的特征根和方差贡献率

Table 6 Eigenvalue and variance contribution of principal components

主成分 Component	特征根 Eigenvalues	方差 贡献率/% % of Variance	累计方差 贡献率/% Cumulative	主成分 Component	特征根 Eigenvalues	方差 贡献率/% % of Variance	累计方差 贡献率/% Cumulative
主成分 1(OM) PC1	5.643	80.608	80.608	主成分 2(OMNPK) PC2	1.035	14.784	95.392
主成分 3(RSD) PC3	0.176	2.513	97.905	主成分 4(RSDNPK) PC4	0.030	1.148	99.053
主成分 5(N) PC 5	0.0299	0.428	99.481	主成分 6(NPK) PC 6	0.025	0.359	99.840
主成分 7(CK) PC 7	0.011	0.160	100.000				

以第一主成分为主,第二主成分为辅,按照各因子得分值从大到小重新排列,进一步确定不同施肥方式对各因子的影响力(表 7)。第一主成分贡献较大的为土壤动物群落的个体数和线虫动物个体数,特征向量分别为 2.661 和 2.019,表明第一主成分中各施肥方式对土壤动物群落的个体数量的综合影响最明显;其次是大蚓类个体数量和密度-类群指数 DG,特征向量分别为-0.337 和-0.348,对土壤动物群落 Shannon-Wiener 多样性指数 H' 和均匀度的影响最小。第二主成分中各施肥方式对线虫动物门的个体数量综合影响最大,其次是甲螨亚目个体数量和土壤动物群落类群数,而对等节跳科的个体数量影响最小。从各得分值的大小来看,第一主成分中特征向量最大为 2.661,最小值为-0.438,相差较大,表明各种施肥方式对土壤动物类群的影响存在不均衡性。

综合上述分析,土壤动物群落的总个体数量、线虫动物门个体数量、大蚓类个体数量、密度-类群指数 DG、甲螨亚目个体数量及土壤动物群落类群数等 6 个指标对施肥方式响应敏感;其中,土壤动物群落个体数量、类群数、DG 指数属于群落的特征指标;因此,土壤动物群落特征指标(个体数、类群数、多样性)、线虫动物个体数量、大蚓类个体数量、甲螨亚目个体数量等指标能够预测长期施肥引起的土壤主要养分的变化。

表 7 施肥方式对土壤动物群落影响的综合评价
Table 7 Comprehensive evaluation on soil fauna community of fertilization regimes

类别 Sorts	PRIN1	PRIN2	类别 Sorts	PRIN1	PRIN2
个体数 Individuals	2.661	-0.168	线虫动物门 Nematode	2.019	0.219
大蚓类 Megadrile	-0.337	-0.053	DG 指数 DG index	-0.348	0.009
甲螨亚目 Oribatida	-0.350	0.066	丰富度 Abundance	-0.416	-0.035
等节跳科 Isotomidae	-0.373	-0.181	类群数 Groups	-0.377	0.030
前气门亚目 Prostigmata	-0.378	0.023	中气门亚目 Mesostigmata	-0.398	-0.002
线蚓科 Enchytraeidea	-0.399	-0.022	蚁科 Formicidae	-0.431	0.013
H'指数 Shannon-Wiener index H'	-0.436	0.012	均匀度 Evenness	-0.438	0.013

3 讨论

3.1 土壤动物群落多样性对土壤肥力的响应

土壤动物群落结构组成及多样性受土壤性质等因素的深刻影响,其分布格局存在一定的差异^[9]。紫色土有机质缺乏导致土壤肥力退化,通过长期施肥土壤有机质、全氮、全磷和全钾等指标含量比 2005 年均不同程度提高^[25]。已有研究表明,土壤动物个体密度与土壤有机质、氮、磷和钾含量呈正相关^[3,9],本文的调查数据(表 2)也表明在不同施肥方式下,土壤养分变化明显,且土壤有机质、全氮、全磷和全钾等含量的变化趋势与土壤动物群落多样性动态基本一致,说明土壤主要养分变化对土壤动物群落的影响较大;但环境中的温度和降雨量也会影响土壤动物的分布,这方面的影响有待于进一步研究。尽管紫色土长期施肥对土壤肥力有所改善,但与同类研究相比土壤动物群落多样性和丰富度均较低^[4-6,9]。这可能缘于紫色土有机质缺乏和土壤肥力退化有关^[18],说明土壤肥力退化可能降低土壤动物群落的多样性。但本研究也表明,有机物料(秸秆和猪粪)的投入有益于提升土壤动物群落多样性和丰富度,而土壤肥力的改良也是明显的(表 2),表明土壤动物群落组成对土壤肥力变化的响应较为敏感。

平衡施肥有益于提升土壤总体质量和土壤动物的生存^[5-6]。本研究中,不同施肥方式对土壤动物群落多样性影响不一致。对土壤动物群落类群数和多样性分析均表明,RSDNPK、OM 和 OMNPK 等施肥方式下,土壤动物群落组成丰富,具有较高的群落多样性,且高于施化肥的 N、NPK 和无肥对照小区;可见,长期有机物料的投入对增加土壤动物丰富度与多样性有明显正效应。通常认为,土壤动物群落多样性与丰富度是土壤肥力的重要标志^[26-27],长期施用有机肥提升了土壤有机质含量,同时,有机肥显著改善土壤结构等土壤理化特性,提高土壤的保肥能力和缓冲性能,改善了土壤肥力,为土壤动物提供了重要的可利用资源和更为合适的生存微环境^[6,28],进而使土壤动物群落多样性和丰富度高于其它未施有机肥的样地。因此,土壤动物群落多样性和丰富度与土壤肥力具有很好的响应关系,是土壤肥力的重要体现。

3.2 土壤动物作为土壤质量变化的指示意义

主成分分析使众多土壤动物指标简化为 6 个,综合考虑第一主成分的贡献率、负荷值和其它因子的基础上,进一步分析第二主成分的贡献,发现施肥方式对土壤动物群落的总个体数量、总类群数、线虫动物门个体数量、大蚓类个体数量、甲螨亚目个体数量及密度-类群指数 DG 等 6 个指标的影响较大,说明这六个指标对施肥方式的响应较为敏感,可能预测长期施肥造成的土壤肥力变化。土壤肥力是土壤质量的核心内容,长期施肥会对土壤肥力产生重要影响,从而导致土壤质量的变化^[29]。施用有机肥可增加土壤有机质含量(表 1),同时也提高了土壤综合肥力,而土壤动物群落多样性和丰富度是土壤肥力高低的重要体现;因此,土壤动物具

有指示土壤质量变化的潜力。Doran 等^[30]查验了土壤动物作为土壤质量指示者的可能性,认为土壤质量状况的检测中应该包括某些土壤动物指标,但发现筛选利用这些作为指标上存在一些问题。Yan 等^[16]2012 根据土壤动物群落指标(多样性、功能特性及丰富度)研究出一个新的指标(FAI)来评价土壤质量变化,并取得非常好的效果。本研究发现,土壤动物群落总个体数量、总类群数、线虫动物门个体数量、大蚓类个体数量、甲螨亚目个体数量及密度-类群指数 DG 等 6 个指标对土壤肥力变化响应敏感;其中,土壤动物群落个体数量、总类群数、DG 指数属于群落特征指标,因此,土壤动物群落特征指数(个体数、类群数和 DG 指数)和线虫、大蚓类和甲螨亚目个体数量等指标与土壤质量变化存在密切联系,有可能用于土壤质量变化的指示,但还有待于进一步的研究证实。因此,土壤动物对于土壤质量变化的指示具有一定潜力。

4 结论

长期施肥对农田土壤动物群落影响显著,有机肥(OM)、有机肥与化肥氮磷钾混施(OMNPK)和秸秆还田与化肥氮磷钾混施(RSDNPK)3 种施肥方式下,土壤动物群落多样性与丰富度相比其它施肥方式有显著提高,说明有机物料的长期投入有利于农田土壤动物的生存和繁衍。施肥方式对土壤动物主要类群密度的影响差异性极显著,表明施肥方式对土壤动物类群的影响不均衡;施肥方式对土壤动物群落个体数量、总类群数、线虫个体数量、大蚓类个体数量、甲螨亚目个体数量和 DG 指数等 6 个指标的影响较大,这 6 个指标对施肥方式的响应较为敏感,初步认为这些指标可能用于预测长期施肥引起的土壤肥力变化,对于土壤质量变化的指示具有一定潜力。

References:

- [1] Carrillo T, Ball B A, Bradford M A, Jordan C F, Molina M. Soil fauna alter the effects of litter composition on nitrogen cycling in a mineral soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(7): 1440-1449.
- [2] Evans T A, Dawes T Z, Ward P R, Lo N. Ants and termites increase crop yield in a dry climate. *Nature*, 2011, 2(3): 262-262.
- [3] Wu P F, Yang D X. Effect of habitat degradation on soil meso-and microfaunal communities in the Zoigê Alpine Meadow, Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(13): 3745-3757.
- [4] Diekötter T, Wamser S, Wolters V, Birkhofer K. Landscape and management effects on structure and function of soil arthropod communities in winter wheat. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 137(1/2): 108-112.
- [5] Zhu Q G, Zhu A N, Zhang J B, Zhang H C, Xin X L. Effects of long-term fertilization on cropland soil meso-micro arthropods in Huang-Huai-Hai Plain of China. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(1): 69-74.
- [6] Kautz T, López-fando C, Ellmer F. Abundance and biodiversity of soil microarthropods as influenced by different types of organic manure in a long-term field experiment in Central Spain. *Applied Soil Ecology*, 2006, 33(3): 278-285.
- [7] Brennan A, Fortune T, Bolger T. Collembola abundances and assemblage structures in conventionally tilled and conservation tillage arable systems. *Pedobiologia*, 2006, 50(2): 135-145.
- [8] Alves M V, Santos J C P, de Gois D T, Alberton J V, Baretta D. Soil macrofauna as influenced by chemical fertilizers and swine manure use in western Santa Catarina state. Brazil. *Revista Brasileira De Ciencia Do Solo*, 2008, 32(2): 589-598.
- [9] Lin Y H, Huang Q H, Liu H, Peng C, Zhu P, Zhang S Q, Zhang F D. Effect of long-term cultivation and fertilization on community diversity of cropland soil animals. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(11): 2261-2269.
- [10] López-hernández D, Araujo Y, López A, Hernández-Valencia I, Hernández C. Changes in soil properties and earthworm populations induced by long-term organic fertilization of a sandy soil in the Venezuelan Amazonia. *Soil Science*, 2004, 169(3): 188-194.
- [11] Qi S, Zhao X R, Zheng H X, Lin Q M. Changes of soil biodiversity in Inner Mongolia steppe after 5 years of N and P fertilizer applications. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(13): 3745-3757.
- [12] Guðleifsson B E. Impact of long term use of fertilizer on surface invertebrates in experimental plots in a permanent hayfield in Northern-Iceland. *Agricultural Society of Iceland*, 2002, 15: 37-49.
- [13] Reeleder R D, Miller J J, Ball Coelho B R, Roy R C. Impacts of tillage, cover crop, and nitrogen on populations of earthworms, microarthropods, and soil fungi in a cultivated fragile soil. *Applied Soil Ecology*, 2006, 33(3): 243-257.
- [14] Fu S L, Zou X M, Coleman D. Highlights and perspectives of soil biology and ecology research in China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(5): 868-876.

- [15] Paolo A G, Raffaella B, Danio A, Attilio D R A M, Ettore C. Assessment of soil-quality index based on microarthropods in corn cultivation in Northern Italy. *Ecological Indicators*, 2010, 10(2): 129-135.
- [16] Yan S K, Singh A N, Fu S L, Liao C H, Wang S L, Li Y L, Cui Y, Hu L L. A soil fauna index for assessing soil quality. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 47(4): 158-165.
- [17] Laboratory of Soil Research, Chengdu Branch, Chinese Academy of Sciences. *Purple Soils in China*. Beijing: Science Press, 1991.
- [18] Zhu B, Chen S, You X, Peng K, Zhang X W. Soil fertility restoration on degraded upland of purple soil. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(5): 743-749.
- [19] Zhu X Y, Zhu B, Wu P F. Response of soil fauna to fertilization in Purple soil. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2010, 16(6): 784-788.
- [20] Zhu B, Wang T, Kuang F H, Luo Z X, Tang J L, Xu T P. Measurements of nitrate leaching from a hillslope cropland in the Central Sichuan Basin, China. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(4): 1419-1426.
- [21] Yin W Y. *Pictorial Keys to Soil Animals of China*. Beijing, China: Science Press, 1998.
- [22] Zhong J M. *Taxonomy of Insect Larva*. Beijing: China Agriculture Press, 1990.
- [23] Liu G S. *Soil Physical, Chemical Analysis and Description of Soil Profiles*. Beijing: Standards Press of China, 1996: 30-67.
- [24] Liao C H, Li J X, Yand Y P, Zhang Z C. The community of soil animal in Tropical Rain Forest in Jianfengling Moubtain, Hainan Island, China. —Composition and characteristics of community. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(11): 1866-1872.
- [25] Kuang F H. Impact of Different Fertilization on Nitrogen Movement and Loss in Slope Cropland of Purple Soil [D]. Chengdu: Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [26] Wu T, Ayres E, Bardgett R D, Wall D H, Garey J R. Molecular study of worldwide distribution and diversity of soil animals. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(43): 17720-17725.
- [27] Zhao Y C, Wang P, Li J L, Chen Y R, Ying X Z, Liu S Y. The effects of two organic manures on soil properties and crop yields on a temperate calcareous soil under a wheat-maize cropping system. *European Journal of Agronomy*, 2009, 31(1): 36-42.
- [28] Ge G F, Li Z J, Zhang J, Wang L G, Xu M G, Zhang J B, Wang J K, Xie X L, Liang Y C. Geographical and climatic differences in long-term effect of organic and inorganic amendments on soil enzymatic activities and respiration in field experimental stations of China. *Ecological Complexity*, 2009, 6(4): 421-431.
- [29] Du L Z, Gao W D, Chen S Y, Hu C S, Ren T S. Effect of conservation tillage on soil quality in the piedmont plain of Mount Taihang. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(5): 1134-1142.
- [30] Doran J W. Defining soil quality for a sustainable environment // *Soil Science Society of American Special Publication Number 35*. Madison, Wisconsin, 1994: 91-106.

参考文献:

- [3] 吴鹏飞, 杨大星. 若尔盖高寒草甸退化对中小型土壤动物群落的影响. *生态学报*, 2011, 31(13): 3745-3757.
- [5] 朱强根, 朱安宁, 张佳宝, 张焕朝, 钦绳武, 信秀丽. 长期施肥对黄淮海平原农田中小型土壤节肢动物的影响. *生态学杂志*, 2010, 29(1): 69-74.
- [9] 林英华, 黄庆海, 刘骅, 彭畅, 朱平, 张树清, 张夫道. 长期耕作与长期定位施肥对农田土壤动物群落多样性的影响. *中国农业科学*, 2010, 43(11): 2261-2269.
- [11] 齐莎, 赵小蓉, 郑海霞, 林启美. 内蒙古典型草原连续 5 年施用氮磷肥土壤生物多样性的变化. *生态学报*, 2010, 30(20): 5518-5526.
- [17] 中国科学院成都分院土壤研究室. *中国紫色土 (上篇)*. 北京: 科学出版社, 1991.
- [18] 朱波, 陈实, 游祥, 彭奎, 张先婉. 紫色土退化旱地的肥力恢复与重建. *土壤学报*, 2002, 39(5): 743-749.
- [19] 朱新玉, 朱波, 吴鹏飞. 土壤动物对紫色土施肥方式的响应. *应用与环境生物学报*, 2010, 16(6): 784-788.
- [21] 尹文英. *中国土壤动物检索图鉴*. 北京: 科学出版社, 1998.
- [22] 钟觉民. *幼虫分类学*. 北京: 农业出版社, 1990.
- [23] 刘光崧. *土壤理化分析与剖面描述*. 中国标准出版社, 1996: 30-67.
- [24] 廖崇惠, 李健雄, 杨悦屏, 张振才. 海南尖峰岭热带林土壤动物群落——群落的组成及其特征. *生态学报*, 2002, 22(11): 1866-1872.
- [25] 况福虹. 紫色土坡耕地施肥对氮素迁移与流失特征的影响 [D]. 成都: 中国科学院·水利部成都山地灾害与环境研究所, 2006.
- [29] 杜章留, 高伟达, 陈素英, 胡春胜, 任图生. 保护性耕作对太行山前平原土壤质量的影响. *中国生态农业学报*, 2011, 19(5): 1134-1142.

附表 不同施肥方式土壤动物群落类群与数量组成

Appdenx table The richness and abundance of soil fauna community in different fertilization regimes

类群 Taxa	施肥方式 Fertilization regimes						
	CK	N	OM	RSD	NPK	OMNPK	RSDNPK
网足目 Gromiida	2	1	8	4	6	2	9
鞭毛纲 Mastigophora	0	0	0	0	5	0	2
涡虫纲 Turbellaria	0	0	6	0	0	0	0
真缓足纲 Eutardigrada	1	0	0	0	0	0	0
蛭态目 Bdelloidea	0	4	11	21	8	9	5
游泳目 Ploimida	0	0	0	0	0	3	1
线虫动物门 Nematode	746	601	1138	1480	936	1014	1637
线蚓科 Enchytraeidae	12	2	24	33	21	18	21
大蚓类 megadrile	13	13	54	38	22	27	45
蚁科 Formicidae	80	26	34	26	24	22	26
叶甲科 Chrysomelidae	0	0	0	1	1	3	0
隐翅甲科 Staphylinidae	0	0	7	2	0	0	1
苔甲科 Scydmaenidae	0	1	0	0	0	0	0
蚁甲科 Pselaphidae	0	0	0	0	1	0	0
古瘦隐甲科 Archerypticidae larvae	0	0	0	0	1	0	0
葬甲科 Silphidae	0	0	2	0	0	0	0
蚁甲科幼 Pselaphidae larvae	1	0	0	2	1	0	0
粗角叩甲科幼 Throscidae larvae	1	0	0	1	0	0	0
萤科幼 Lampyridae larvae	0	1	0	0	0	0	0
金龟甲科幼 Scarabaeidae larvae	1	0	0	0	0	0	0
螻蛄科 Ceratopogonidae	0	0	0	0	0	0	1
尖眼蕈蚊科 Sciaridae	0	1	0	0	0	0	0
长足虻科 Dolichopodidae larvae	3	2	0	0	0	0	0
鹬虻科 Rhagionidae larvae	0	0	1	0	0	0	0
大蚊科 Tipulidae larvae	0	0	0	0	0	1	0
蚤蝇科 Phoridae	0	0	0	0	0	0	1
瘿蚊科 Cecidomyiidae	0	0	0	0	0	0	3
摇蚊科 Chironomidae larvae	0	0	3	0	0	0	0
粪蝇科 Scathophagidae	0	0	1	0	0	0	0
管蓟马科 Phlaeothripidae	3	0	0	0	0	0	1
鼻蠹科 Rhinotermitidae	0	0	0	1	1	1	0
木蠹科 Kalotermitidae	0	0	0	0	0	3	0
疣跳科 Neanridae	0	0	0	0	0	2	1
跳虫属 Podura	0	2	1	0	0	0	0
蟋蟀科 Gryllidae	0	0	0	3	0	0	2
鼠啮科 Myopsocidae	0	1	0	0	0	0	0
虱啮科 Liposcelidae	1	4	4	5	5	3	2
等节跳科 Isotomidae	15	26	45	53	51	47	84
长角跳科 Entomobryidae	0	0	1	0	0	0	0
圆跳科 Sminthuridae	1	5	12	9	2	2	9
棘跳科 Onychiuridae	1	1	9	17	5	6	13
石蛎科 Machilidae	2	1	0	0	0	0	1
石蜈蚣目 Henicopidae	3	0	3	1	0	1	6
地蜈蚣目 Ballophilidae	0	0	1	3	3	5	1
带马陆目 Cryptodesmidae	0	0	0	2	1	1	0

续表

类群 Taxa	施肥方式 Fertilization regimes						
	CK	N	OM	RSD	NPK	OMNPK	RSDNPK
猛水蚤目 Harpacticoida	2	4	3	14	12	4	2
蠕虫总纲 Paupoda	0	0	0	0	0	2	0
康八科 Campodeidae	1	0	5	2	0	4	2
铗八科 Japygidae	9	9	3	5	3	9	4
始蛭科 Protentomidae	0	0	2	0	1	0	0
古蛭科 Eosentomidae	0	0	0	0	1	2	0
么蚰科 Scuti-gerellidae	0	1	0	0	3	0	0
鼠妇虫科 Porcellioidea	0	0	0	0	1	0	0
甲螨亚目 Oribatida	25	26	16	35	38	76	44
前气门亚目 Prostigmata	26	30	20	30	20	21	17
中气门亚目 Mesostigmata	11	11	12	33	23	16	22
蜘蛛目 Araneae	3	1	0	1	4	0	3
类群数 Groups	23	23	26	25	26	26	29
Σ	963	774	1426	1822	1200	1303	1966

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33 ,No.2 January ,2013(Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Spatio-temporal heterogeneity of water and plant adaptation mechanisms in karst regions; a review CHEN Hongsong, NIE Yunpeng, WANG Kelin (317)
- Impacts of mangrove vegetation on macro-benthic faunal communities CHEN Guangcheng, YU Dan, YE Yong, et al (327)
- Advance in research on the occurrence and transformation of arsenic in the freshwater lake ecosystem ZHANG Nan, WEI Chaoyang, YANG Linsheng (337)
- Application of nano-scale secondary ion mass spectrometry to microbial ecology study HU Hangwei, ZHANG Limei, HE Jizheng (348)
- Carbon cycle of urban system; characteristics, mechanism and theoretical framework ZHAO Rongqin, HUANG Xianjin (358)
- Research and compilation of urban greenhouse gas emission inventory LI Qing, TANG Lina, SHI Longyu (367)

Autecology & Fundamentals

- Seed dispersal and seedling recruitment of *Ulmus pumila* woodland in the Keerqin Sandy Land, China YANG Yunfei, BAI Yunpeng, LI Jiandong (374)
- Influence of environmental factors on seed germination of *Bombax malabaricum* DC. ZHENG Yanling, MA Huancheng, Scheller Robert, et al (382)
- Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometric characteristics during the decomposition of *Spartina alterniflora* and *Cyperus malaccensis* var. *brevifolius* litters OUYANG Linmei, WANG Chun, WANG Weiqi, et al (389)
- Home range of *Teratoscincus roborowskii* (Gekkonidae): influence of sex, season, and body size LI Wenrong, SONG Yucheng, SHI Lei (395)
- Effects of the covering behavior on food consumption, growth and gonad traits of the sea urchin *Glyptocidaris crenularis* LUO Shibin, CHANG Yaqing, ZHAO Chong, et al (402)
- Biological response of the rice leaffolder *Cnaphalocrocis medinalis* (Güenée) reared on rice and maize seedling to temperature LIAO Huaijian, HUANG Jianrong, FANG Yuansong, et al (409)

Population, Community and Ecosystem

- Composition and stability of organic carbon in the top soil under different forest types in subtropical China SHANG Suyun, JIANG Peikun, SONG Zhaoliang, et al (416)
- The community characteristics of different types of grassland under grazing prohibition condition ZHANG Pengli, CHEN Jun, CUI Shujuan, et al (425)
- Spatial pattern and competition relationship of *Stellera chamaejasme* and *Aneurolepidium dasystachys* population in degraded alpine grassland REN Heng, ZHAO Chengzhang (435)
- SOC decomposition of four typical broad-leaved Korean pine communities in Xiaoxing' an Mountain SONG Yuan, ZHAO Xizhu, MAO Zijun, et al (443)
- The influence of vegetation restoration on soil archaeal communities in Fuyun earthquake fault zone of Xinjiang LIN Qing, ZENG Jun, ZHANG Tao, et al (454)
- Effects of fertilization regimes on soil faunal communities in cropland of purple soil, China ZHU Xinyu, DONG Zhixin, KUANG Fuhong, et al (464)
- Woody plant leaf litter consumption by the woodlouse *Porcellio scaber* with a choice test LIU Yan, LIAO Yuncheng (475)
- The bacterial community of coastal sediments influenced by cage culture in Xiangshan Bay, Zhejiang, China QIU Qiongfeng, ZHANG Demin, YE Xiansen, et al (483)
- A study of meiofauna in the COMRA's contracted area during the summer of 2005 WANG Xiaogu, ZHOU Yadong, ZHANG Dongsheng, et al (492)
- Hydrologic regime of interception for typical forest ecosystem at subalpine of Western Sichuan, China SUN Xiangyang, WANG Genxu, WU Yong, et al (501)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Sensitivity and vulnerability of China's rice production to observed climate change XIONG Wei, YANG Jie, WU Wenbin, et al (509)

Characteristics of temperature and precipitation in Northeastern China from 1961 to 2005	HE Wei, BU Rencang, XIONG Zaiping, et al (519)
Combined effects of elevated O ₃ and reduced solar irradiance on growth and yield of field-grown winter wheat	ZHENG Youfei, HU Huifang, WU Rongjun, et al (532)
Resource and Industrial Ecology	
The study of vegetation biomass inversion based on the HJ satellite data in Yellow River wetland	GAO Mingliang, ZHAO Wenji, GONG Zhaoning, et al (542)
Temporal and spatial variability of soil available nutrients in arable Lands of Heyang County in South Loess Plateau	CHEN Tao, CHANG Qingrui, LIU Jing, et al (554)
Decomposition characteristics of wheat straw and effects on soil biological properties and nutrient status under different rice cultivation	WU Ji, GUO Xisheng, LU Jianwei, et al (565)
Effects of nitrogen application stages on photosynthetic characteristics of summer maize in high yield conditions	LÜ Peng, ZHANG Jiwang, LIU Wei, et al (576)
Urban, Rural and Social Ecology	
The degradation threshold of water quality associated with urban landscape component	LIU Zhenhuan, LI Zhengguo, YANG Peng, et al (586)
Ecological sustainability in Chang-Zhu-Tan region; a prediction study	DAI Yanan, HE Xinguang (595)
The effect of exogenous nitric oxide on activities of antioxidant enzymes and microelements accumulation of two rice genotypes seedlings under cadmium stress	ZHU Hanyi, CHEN Yijun, LAO Jiali, et al (603)
Forms composition of inorganic carbon in sediments from Dali Lake	SUN Yuanyuan, HE Jiang, LÜ Changwei, et al (610)
Fractionation character and bioavailability of Cd, Pb, Zn and Ni combined pollution in oasis soil	WU Wenfei, NAN Zhongren, WANG Shengli, et al (619)
Effects of CA and EDTA on growth of <i>Chlorophytum comosum</i> in copper-contaminated soil	WANG Nannan, HU Shan, WU Dan, et al (631)
Research Notes	
Values of marine ecosystem services in Haizhou Bay	ZHANG Xiuying, ZHONG Taiyang, HUANG Xianjin, et al (640)
Variations of <i>Leymus chinensis</i> community, functional groups, plant species and their relationships with climate factors	TAN Liping, ZHOU Guangsheng (650)
The effect of N:P supply ratio on P uptake and utilization efficiencies in <i>Larix olgensis</i> Henry. seedlings	WEI Hongxu, XU Chengyang, MA Lüyi, et al (659)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 2 期 (2013 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 2 (January, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元